

El Suelo: Pasado, Presente y Futuro de la Vida

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo

Editores

Sandra Monserrat Barragan Maravilla | Miguel Ángel Segura Castruita | Edmundo Robledo Santoyo | Oscar Fernández Fernández | Juan Uriel Avelar Roblero | Dámaris Leopoldina Ojeda Barrios | Bruno Manuel Chávez Vergara | Gabriel Alejandro Hernandez Vallecillo | Miriam Galán Resendiz | Langen Corlay Chee

ISBN: 978-607-26878-1-3

El Suelo: Pasado, Presente y Futuro de la Vida

Universidad Autónoma Chapingo, México, diciembre de 2025.

AGRADECIMIENTOS:

Todas las aportaciones aquí vertidas fueron revisadas y aprobadas mediante revisión por pares realizada por investigadores y académicos de múltiples instituciones que fungieron como árbitros. Nuestro agradecimiento y reconocimiento a todos aquellos que hicieron posible la publicación de este libro.

INSTITUCIONES PARTICIPANTES



Editores: Sandra Monserrat Barragan Maravilla | Miguel Ángel Segura Castruita | Edmundo Robledo Santoyo | Oscar Fernández Fernández | Juan Uriel Avelar Roblero | Dámaris Leopoldina Ojeda Barrios | Bruno Manuel Chávez Vergara | Gabriel Alejandro Hernandez Vallecillo | Miriam Galán Resendiz | Langen Corlay Chee.

Diseño: Sandra Monserrat Barragan Maravilla | Gabriel Alejandro Hernandez Vallecillo.
Portada: Sandra Monserrat Barragan Maravilla (imagen generada con ideogram. ai, 2025. Una delicada ilustración en acuarela pastel de un perfil del suelo con tres horizontes, rodeado de árboles, cultivos, un drone y un sitio arqueológico, fondo blanco).
Contraportada: (Fátima Guadalupe Roldán Ramírez).
Título: El Suelo Pasado, Presente y Futuro de la Vida.

Descripción: Primera Edición Digital. | Texcoco, México | Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. (SMCS), 2025.
Identificadores: ISBN Digital: 978-607-26878-1-3

Temas: Los Suelos en el Espacio y Tiempo; Propiedades y Procesos del Suelo; Uso y Manejo del Suelo; El Papel del Suelo en la Sostenibilidad del Medio Ambiente y la Sociedad; Ciencias de Frontera y Multidisciplinarias del Suelo; Ecología y Ciencias de la Tierra.

Los manuscritos incluidos en este libro fueron arbitrados por pares académicos. El contenido o información vertida es responsabilidad exclusiva de cada autor.

Primera Edición. ISBN: 978-607-26878-1-3
D. R. ©1st Edition
Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. (SMCS), 2025
Publisher
Km. 38.5, Carretera México-Texcoco.
Universidad Autónoma Chapingo, Edificio del Departamento de Suelos,
C.P. 56230, Apartado Postal 45.
Chapingo, Estado de México. México.
Esta edición y sus características son propiedad de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Prohibida su reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.
La versión electrónica de este libro es gratuita. Disponible en la página de la SMCS (https://www.smcsmx.org/)
Diseño y formación: Editores
Hecho en México

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo

MESA DIRECTIVA (2023-2025)

Dr. Fabián Fernández Luqueño

Presidente

Dra. Dámaris Leopoldina Ojeda Barrios

Vicepresidenta

Dr. Hermes Pérez Hernández

Secretaría General

Dra. Dulce Yaahid Flores Rentería

Tesorera

Dr. Edgar Vázquez Núñez

Secretaría Técnica

Dr. Oscar Cruz Álvarez

Secretaría de Eventos Nacionales e Internacionales

Dra. Miriam Galán Resendiz

Secretaría de Relaciones Públicas

M.C. Iris del Carmen Morales Espinoza

Subsecretaría de Fomento a la Integración, Promoción y Mercado

Dr. Gabriel Alejandro Hernandez Vallecillo

Secretaría de Acción Juvenil

M.C. Ricardo González Zavaleta

Secretaría de Promoción de Membresías

Dra. Rosalía Castelán Vega

Secretaría de Educación y Enseñanza

M.C. Ramón Saúl Luján Aguirre

Secretaría de Difusión y Comunicación Social

Dra. Sandra Monserrat Barragan Maravilla

Subsecretaría de Creación de Contenido Digital

Dra. Susana González Morales

Secretaría de Gestión de Redes de Innovación

Universidad Autónoma Chapingo

DIRECTORIO

Dr. Ángel Garduño García

Rector

M. C. Noé López Martínez

Director General Académico

Dra. Consuelo Silvia Olivia Lobato Calleros

Directora General de Investigación, Posgrado y Servicio

Mtra. Tania Jessica Pérez Buendía

Directora de Difusión Cultural

Ing. Jorge Torres Bribiesca

Director General de Administración

Dr. Samuel Pérez Nieto

Director General de Patrimonio y Finanzas

M.C. Raúl Zapata Rosales

Director del DEIS en Suelos

Dr. David Cristóbal Acevedo

Subdirector Académico del DEIS en Suelos

Dra. Miriam Galán Resendiz

Subdirectora de Investigación del DEIS en Suelos

Ing. Francisco Razo López

Subdirector Administrativo del DEIS en Suelos

EDITORES

Sandra Monserrat Barragan Maravilla

Miguel Ángel Segura Castruita

Edmundo Robledo Santoyo

Oscar Fernández Fernández

Juan Uriel Avelar Roblero

Dámaris Leopoldina Ojeda Barrios

Bruno Manuel Chávez Vergara

Gabriel Alejandro Hernandez Vallecillo

Miriam Galán Resendiz

Langen Corlay Chee

ÁRBITROS

Sandra Monserrat Barragan Maravilla
Langen Corlay Chee
Edmundo Robledo Santoyo
Miriam Galán Resendiz
Gabriel Alejandro Hernandez Vallecillo
Elizabeth Hernández Acosta
Miguel Ángel Segura Castruita
Bruno Manuel Chávez Vergara
Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena
Oscar Fernández Fernández
César Antonio Cassasola Elizondo
Oscar Cruz Álvarez
Joel Pineda Pineda
Dámaris Leopoldina Ojeda Barrios
José Francisco Preciado Guzmán
Juan Uriel Avelar Roblero
Ranferi Maldonado Torres
Fernando Ayala Niño
Antonio Baez Rogelio
Ezequiel Muñoz Márquez
Blanca Estela Santiago Mejía
Orlando Catalán Barrera
Fabián Fernández Luqueño
Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena
Karla Liliana López García
Elizabeth Solleiro Rebolledo
Agueda Elena Ceniceros Gómez
Dulce Yaahid Flores Rentería
Víctor Manuel Montoya Jasso
David Jesús Palma López
Hilda Rivas Solórzano
Nadia Silvana Santini González
Gilberto Vela Correa
Susana Adriana Montaño Arias
Ofelia Ivette Beltrán Paz
Martha Daniela Bobadilla Ballesteros
Eduardo Misael Choreño Parra
Ángel Mena García
Alonso Méndez López
Noe Montaño Arias
Claudia Janeth Olivas Castillo
Hermes Pérez Hernández
María Yasmín Rivera Uria
César Roberto Sarabia Castillo
Rosalía del Carmen Castelán Vega
Erandi Frutos Hernández
Jazmín Montserrat Gaucin Delgado
Alma Delia Hernández Fuentes
Sarahi Moya Cadena
Armando Navarrete Segura
Víctor Manuel Ordaz Chaparro
Martha Lucía Vargas Terminel
Edgar Vázquez Núñez
Brenda Gisela Robledo Olmedo

ÍNDICE

División I. Los suelos en el espacio y tiempo 1

CLASIFICACIÓN DE LOS ANDOSOLS BAJO DIFERENTES SISTEMAS AGROFORESTALES EN ZACATLÁN, PUEBLA 2

EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN AGRÍCOLA DE LOS SUELOS DEL COLEGIO DE POSTGRADUADOS CAMPUS MONTECILLO 7

FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA PARA LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN TRES SUELOS DE LA SUBCUENCA RÍO SAHUAYO 12

HACIA UN SISTEMA DE INFERENCIA ESPACIAL DE SUELOS: RESCATE, ARMONIZACIÓN Y MODELACIÓN DIGITAL DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO 17

CLASIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE COMPONENTES DEL SUELO EN SECCIÓN DELGADA: FUNCIONES DISCRIMINANTES BASADAS EN VALORES DE BRILLO 23

PEDOLOGÍA DE LAS TERRAZAS AGRÍCOLAS POPOLOCAS DE PUEBLA 28

INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE PROPIEDADES EDÁFICAS PARA EVALUAR LA GOBERNANZA DE LOS SUELOS DEL COLEGIO DE POSTGRADUADOS, CAMPUS MONTECILLO 33

DIVERSIDAD DE SUELOS Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS: IMPLICACIONES PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE SUELOS EJIDALES EN TEPEZALÁ, AGUASCALIENTES 38

EVALUACIÓN DEL MANEJO AGRONÓMICO EN HORIZONTE Ap MEDIANTE MACROMOSAICOS DIGITALES *IN SITU* 43

PROPUESTA DE MODIFICACIÓN A LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS BARRIOS DEL CÓDICE SANTA MARÍA ASUNCIÓN 48

EVALUACIÓN DE LA AGREGACIÓN DEL SUELO EN DIFERENTES MANEJOS AGROFORESTALES: UN ENFOQUE MICROMORFOMÉTRICO 53

EL SUELO Y SU UBICACIÓN, EN LA PRESENCIA DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EN *Agave tequilana* 58

CARTOGRÁFIA Y ANÁLISIS DE CAMBIO DEL USO DE SUELO CON SERIES TEMPORALES EN SAN FELIPE DEL PROGRESO, MÉXICO 63

CAPACITACIÓN EN MAPEO DIGITAL DE SUELOS PARA COMUNIDADES PROFESIONALES EN AMÉRICA LATINA: CERRANDO BRECHAS LINGÜÍSTICAS Y DE APRENDIZAJE 68

DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL SUELO MEDIANTE UN MÓDULO DE COMPRESIÓN DIGITAL: UNA ALTERNATIVA 72

DISTRIBUCIÓN IÓNICA DEL PLEISTOCENO A LA ACTUALIDAD EN UN SITIO PALEOPEDOLÓGICO DEL LAGO DE TEXCOCO 77

ESTUDIO ETNOPEDOLÓGICO DE LOS SUELOS DE TERRAZAS AGRÍCOLAS EN EL SUR DE PUEBLA 82

EVALUACIÓN DE LA MACRO Y MICROPOROSIDAD EN SISTEMAS DE LABRANZA DE CONSERVACIÓN Y CONVENCIONAL POR MICROFOTOMOSAICOS 87

PREDICCIÓN DEL pH DEL SUELO MEDIANTE MODELOS ESTADÍSTICOS TRADICIONALES Y APRENDIZAJE AUTOMÁTICO EN NUEVO LEÓN 92

RASGOS MICROMORFOLÓGICOS DE SUELOS EN AMBIENTES SEMIÁRIDOS Y DIFERENTES LITOLOGÍAS, LOS REYES METZONTLA, PUEBLA 97

División II. Propiedades del Suelo y Procesos 103

LOS COLÉMBOLOS DE SUELOS AGRÍCOLAS, ¿QUÉ NOS DICEN DE LA SALUD DEL SUELO? 104

AISLAMIENTO DE BACTERIAS DEGRADADORAS DE LIGNINA DE SUELO RIZOSFÉRICO DE *Quercus* spp. 109

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD PROMOTORA DEL CRECIMIENTO VEGETAL DE *Sphingomonas trueperi* AISLADA DEL MUCÍLAGO DEL MAÍZ OLOTÓN 115

EVALUACIÓN DE PELLETS DE ARCILLA COMO VÍA DE INOCULACIÓN BACTERIANA EN LECHUGA 120

Rahnella aquatilis AISLADA DEL MUCÍLAGO DEL MAÍZ OLOTÓN, PROMUEVE EL CRECIMIENTO DE PLANTAS DE CHILE 125

RESPIRACIÓN DEL SUELO EN ÁREAS CON CULTIVO Y SIN CULTIVO DE ZONAS SEMIÁRIDAS 130

INCORPORACIÓN DE SUSTRATOS DE MAÍZ EN UN SUELO CALCÁREO: DINÁMICA DE C-CO_2 Y NITRÓGENO 135

COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE CE MEDIANTE PASTA SATURADA Y PROPORCIONES 1:5 Y 1:10 EN SUELO COSTERO 140

ENMIENDAS MINERALES EN EL USO CONSUNTIVO DE AGUA Y COBERTURA VEGETAL: UN ESTUDIO EN SUELOS BAJO AGRICULTURA INTENSIVA 143

EVALUACIÓN DE LA BIODISPONIBILIDAD DE METALES PESADOS EN SUELOS DE NARANJA DEL ÁREA CITRÍCOLA DE TAMAULIPAS..... 149

ESTABILIDAD DE AGREGADOS EN DOS SUELOS CONTRASTANTES DE LA REGIÓN DEL LAGO DE TEXCOCO, MÉXICO..... 154

MOVILIDAD DE METALES EN TECHNOSOLS A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA REPRODUCCIÓN DE PLANTAS EN VIVERO..... 159

ANÁLISIS EXPLORATORIO EN UNA TOPOSECUENCIA DEL EJIDO LOS DESMONTES, ACÁMBARO GUANAJUATO, MÈXICO..... 164

CARACTERIZACIÓN EDÁFICA DEL CERRO DE LA ESTRELLA, CIUDAD DE MÉXICO 169

GÉNESIS DE LOS SUELOS AFECTADOS POR LA EXPLOTACIÓN MINERA DE LA OBSIDIANA EN EL CERRO DE LAS NAVAJAS..... 175

INTERCALACIÓN DE NITRATOS EN ÓXIDOS MIXTOS LAMINARES Mg/Fe/Al PARA QUÍMICA INTERFACIAL DEL SUELO..... 180

ARTRÓPODOS, MICOBIOTA DE SUELO Y SU RELACIÓN CON PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS EN UN CAFETAL DE OAXACA 184

BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON ACEITE LUBRICANTE USADO MEDIANTE UN EXTRACTO EN POLVO DE *Leonotis nepetifolia* Y VERMICOMPOST 190

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE UN SUELO HIDROFÓBICO EN IXTAPALUCA, ESTADO DE MÉXICO 195

DISTRIBUCIÓN DE SALES SOLUBLES EN LOS SUELOS DEL FONDO LACUSTRE DEL LAGO CRÁTER TECUITLAPA, PUEBLA..... 200

EFECTO DE QUEMAS PRESCRITAS SOBRE LA RESPIRACIÓN POTENCIAL DEL SUELO EN LA RESERVA ECOLÓGICA DE MADERAS DEL CARMEN..... 205

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS IRRIGADOS POR AGUAS PROVENIENTES DEL ALTO BALSAS, MÉXICO 209

EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS EN UN ECOSISTEMA SEMIÁRIDO ETNOAGROFORESTAL..... 214

FORMA Y TAMAÑO DE EDAFOAGREGADOS ESTRUCTURALES EN EL ANP CERRO DE SACROMONTE, ESTADO DE MÉXICO 219

IDENTIFICACIÓN DE BACTERIAS PROVENIENTES DEL PARQUE COMUNAL "EL EPAZOTE" EN COATEPEC, ESTADO DE MÉXICO 224

IDENTIFICACIÓN DE HONGOS MICROSCÓPICOS DE SUELO DEL PARQUE COMUNAL EL EPAZOTE, ESTADO DE MÉXICO 229

INTEMPERISMO ACELERADO DE MATERIALES TÉCNICOS: CAMBIOS DE COLOR COMO INDICADORES DE ESTABILIDAD SUPERFICIAL 234

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE UN SUELO DE MONTAÑA Y UN SUELO CONTAMINADO 239

SUSTRATOS EN LA EMERGENCIA Y DESARROLLO DE ALHELÍ (*Matthiola incana* L.) ... 244

TIPOS DE USO DEL SUELO Y SU RESPIRACION EN ZONAS SEMIARIDAS 249

División III. Uso y Manejo del Suelo 255

RECUPERACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL SUELO EN UNA ZONA SEMIÁRIDA CON OBRAS DE CONSERVACIÓN EN PUEBLA 256

FERTILIDAD QUÍMICA COMPARACIÓN ENTRE MANEJO ORGÁNICO Y CONVENCIONAL EN EL CULTIVO DE MANZANILLA 260

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS DEL COLEGIO DE POSTGRADUADOS CAMPUS MONTECILLO 265

FERTILIDAD QUÍMICA EN SUELOS CULTIVADOS CON MAÍZ DE TEMPORAL EN SUELOS ANDOSOLS 270

FERTILIZACIÓN INTEGRAL Y ACTIVIDAD FISIOLÓGICA EN MAÍZ BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE LABRANZA 274

EFECTO DEL BORO (B) SOBRE EL DESARROLLO INICIAL EN PLÁNTULAS DE TOMATE (*Solanum lycopersicum*) 279

EFECTO DE LA COMPOSTA SOBRE VARIABLES DE CRECIMIENTO EN MAÍZ NATIVO SAN PABLEÑO BLANCO 284

EFFECTOS DE LA REGENERACIÓN NATURAL POST-DEGRADACIÓN EN LAS PROPIEDADES Y MICROBIOMA DE SUELOS FORESTALES DE LA PRECORDILLERA ANDINA 289

BIOINSUMOS Y *Canavalia ensiformis* (L.) PARA LA NUTRICIÓN INTEGRAL DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR EN HUIXTLA, CHIAPAS 294

MACRO Y MESOFAUNA EDÁFICA BAJO DIFERENTES PRÁCTICAS DE MANEJO DEL SUELO EN SAN JOSÉ LAS FLORES, HUIXTÁN, CHIAPAS 299

COMPARACIÓN DEL MANEJO REGENERATIVO Y CONVENCIONAL EN PROPIEDADES DEL SUELO Y CRECIMIENTO ESTRUCTURAL DE MANZANO 303

CARACTERIZACIÓN MORFOANATÓMICA DE COMUNIDADES ECTOMICORRÍCICAS PARA LA RESTAURACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS 308

EVALUACIÓN INTEGRAL DE LAS NANOPARTÍCULAS DE HIERRO EN MAÍZ Y LOMBRICES DE TIERRA 313

REFORESTACIÓN CON ÁRBOLES ECTOMICORRIZADOS EN SUELOS DEGRADADOS CON PRESENCIA DE TEPETATE 318

EVALUACIÓN DE AGROSISTEMAS MEDIANTE INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD EN LA SIERRA NORTE DE PUEBLA 323

INSTRUMENTACIÓN DE SITIOS DE MONITOREO PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN SUELOS URBANOS: CASO CANTERA ORIENTE 328

EFECTO DE UN BIOFERTILIZANTE DE T*richoderma* spp. SOBRE EL CRECIMIENTO DE *RAPHANUS SATIVUS* EN DOS SUELOS 333

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE SUELOS CAFETALEROS BAJO TRES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN HUATUSCO, VERACRUZ 338

CARACTERIZACIÓN DEL SUELO DE UN BOSQUE COMESTIBLE EN OCOZOCOAUTLA DE ESPINOSA, CHIAPAS, MÉXICO 344

EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE USO DE SUELO ENTRE 2001 Y 2021: DISTRITO DE DESARROLLO RURAL COATEPEC, VERACRUZ, MÉXICO 349

INTERACCIÓN DEL SUELO Y MANEJO EN LAS CARACTERÍSTICAS DE UVAS DE DOS VIÑEDOS DE GUANAJUATO 354

ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL DE TRES MICROCUENCAS EN EL OCCIDENTE DEL PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL 359

ANÁLISIS DE SUELOS CULTIVADOS CON *Prunus persica* (L.) Batch. EN ALTZAYANCA, TLAXCALA 364

MANGANESO EN PLANTAS PIONERAS DE SUELOS MINEROS EN NAOPA, HIDALGO, MÉXICO 369

SILICIO MITIGA EL IMPACTO DEL DÉFICIT HÍDRICO EN JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) 374

EFECTOS TEMPRANOS DEL PASTOREO NO SELECTIVO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN MADERAS DEL CARMEN (2022–2024) 379

RESPUESTA FISIOLÓGICA Y BIOQUÍMICA DEL AGUACATE A DIFERENTES ESQUEMAS DE NUTRICIÓN VEGETAL 384

COMPOSICIÓN PROXIMAL Y COMPUESTOS BIOACTIVOS EN FLORES DE DALIA CV YARETZI BIOFORTIFICADAS CON ZINC 389

EVALUACIÓN DE INSUMOS NUTRICIONALES COMPLEMENTARIOS EN RENDIMIENTO Y NUTRICIÓN DEL AGUACATERO 394

INFLUENCIA DEL SILICIO EN LA CALIDAD POSTCOSECHA DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) 399

EFECTO DE LA APLICACIÓN DE BACTERIAS TIPO PGPR Y DE AGENTES BIOESTIMULANTES EN EL CULTIVO DE BRÓCOLI (*Brassica oleracea* var. *italica*) 404

EFECTO DE MICORRIZAS EN EL CRECIMIENTO DE DOS ESPECIES DE *TAGETES* EN UN SUSTRATO ALTO EN FÓSFORO BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO 409

EFECTO DE *Funneliformis mosseae* EN DOS CONCENTRACIONES DE FÓSFORO EN EL CRECIMIENTO DE PAPAYA BAJO INVERNADERO 413

CONCENTRACIONES DE PESTICIDAS EN SUELOS AGRÍCOLAS DEL SUR DE GUANAJUATO 418

PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN SUELOS FUERTEMENTE ALCALINOS EN SANTIAGO DE ANAYA, HIDALGO 423

TAMAÑO Y FECHA DE SIEMBRA DE AJO PARA EVALUAR LOS PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN EN CUAHUTÉMOC, CHIHUAHUA 427

AVANCES Y DESAFÍOS EN LA PRODUCCIÓN Y USO DE BACTERIAS NATIVAS COMO PROBIÓTICOS VEGETALES EN LA AGRICULTURA MEXICANA 432

ECO-FRIENDLY POLYMER FORMULATIONS FOR SUPPRESSING SOIL EROSION AND ENHANCING SOIL PROPERTIES 437

LA APLICACIÓN DE FERTILIZANTES AFFECTA EL DESARROLLO DE PLANTAS DE *Quercus magnolifolia* Y *Quercus laurina* EN CONDICIONES DE VIVERO 442

PROPIEDADES DE VERMICOMPOSTAS A BASE DE COMBINACIONES DE ESTIÉRCOL Y RESIDUOS DE CALABAZA (*Cucurbita* spp.) 447

CALIDAD DEL SUELO EN PLANTACIONES DE AGAVE AZUL (*Agave tequilana* Weber) EN LA SUBCUENCA CHAPALA, MICHOACÁN 452

FERTILIZACIÓN ORGÁNICA, MINERAL Y COMBINADA DEL SISTEMA MAÍZ-FRIJOL INTERCALADO EN GUERRERO, MÉXICO 456

APLICACIÓN FOLIAR DE NANOPARTÍCULAS DE SELENIO Y ZINC SOBRE BIOMASA E INTERCAMBIO GASEOSOS EN ESPINACA 463

EFICIENCIA FOTOSINTÉTICA Y RENDIMIENTO EN PLANTAS DE FRIJOL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MELATONINA 469

BIOFORTIFICACIÓN CON NANOPARTÍCULAS DE YODO SOBRE LA BIOMASA Y CALIDAD MINERAL EN LECHUGA 474

CARACTERISTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y NÚMERO DE ESPORAS DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES DE UN SUELO CAFETALERO CON MANEJO ORGÁNICO 479

COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO DEL MAÍZ H-443A EN TRES CLASES TEXTURALES DE SUELO EN COLIMA, MÉXICO 484

COMPOSICIÓN NUTRIMENTAL DEL SEDIMENTO DE TILAPIA Y SU IMPACTO EN LA FERTILIDAD DE SUELOS DEGRADADOS 489

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN EL DESARROLLO Y CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE CHILTEPÍN 494

CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE PAPAYA EN TRES SUSTRATOS ORGÁNICOS 499

CRECIMIENTO DE TORNACHILE CULTIVADO EN TRES POTENCIALES OSMÓTICOS 504

DINÁMICA DE NITRATOS EN EL PECÍOLO DE CHILTEPÍN BAJO POTENCIALES OSMÓTICOS DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA 509

EFECTO DE LOS BIOFERTILIZANTES EN EL RENDIMIENTO DE CHILE (*Capsicum annuum* L.) 514

EFICIENCIA DE LA APLICACIÓN DE NANOFERTILIZANTES DE MO-ZN SOBRE LOS PARÁMETROS DE INTERCAMBIO GASEOSO EN PORTAINJERTOS DE NOGAL PECANERO 519

ENHANCING PHOSPHORUS USE EFFICIENCY AND PLANT GROWTH WITH BAYÓVAR PHOSPHATE ROCK AND PHOSPHORUS-SOLUBILIZING MICROORGANISMS 524

EVALUACIÓN DE ENRAIZADORES EN ESQUEJES DE PITAHAYA ROJA (*Hylocereus undatus*, Haworth, Britton & Rose) EN TEAPA, TABASCO 530

EVALUACIÓN DE SUSTRATOS PARA EXPERIMENTOS CON PLANTAS DE SOYA BAJO CONDICIONES CONTROLADAS 536

FERTILIDAD DEL SUELO Y DESARROLLO DEL BANANO VARIEDAD "PIÑA" CULTIVADO EN SISTEMA ORGÁNICO 541

ISOLATION AND CHARACTERISATION OF BACTERIA WITH PGPR POTENTIAL IN SEMI-TILLAGE CONDITIONED SOILS 547

LOS INSUMOS ORGÁNICOS INFLUYEN EN LA CALIDAD DE ARÁNDANO (*Vaccinium ashei* R.) CV. "OJO DE CONEJO" 553

RENDIMIENTO DE VARIEDADES DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.) ASOCIADAS CON MAÍZ (*Zea mays* L.) Y CALABAZA (*Cucúrbita pepo* L.) 558

SOSTENIBILIDAD DE LOS SUELOS EN VILLA VICTORIA, ESTADO DE MÉXICO: SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA 563

División IV. El papel de los Suelos en la Sostenibilidad del Medio Ambiente y la Sociedad 568

COLECCIÓN CIENTÍFICA DE COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO "BIOCOSTRATECA" 569

ANÁLISIS DE LA ENSEÑANZA DE LA CIENCIA DEL SUELO EN LA EDUCACIÓN BÁSICA Y MEDIA EN CHILE: COMPARATIVA 2018–2023 573

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE MICROORGANISMOS EN SUELO DE CULTIVO DE GRANADO (*Punica granatum* L.) EN CHILCUAUTLA, HIDALGO, MÉXICO 578

CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS LUVISOLES DE UN GRADIENTE DE PERTUBACIÓN EN UN BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA 583

CAMBIO CLIMÁTICO Y CAMBIO DE USO DE SUELO: ¿CÓMO IMPACTAN SOBRE LA EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO? 588

ALMACENES DE NUTRIENTES EN SUELO DE MANGLARES: INFLUENCIA DE LA ZONA URBANA Y DE LA ESPECIE 594

BIOFRAGMENTACIÓN DE MICROPLÁSTICOS EN SEDIMENTOS DE ARROYOS DEL SURESTE DE COAHUILA, MÉXICO..... 599

ESTADO DE CALCIO, MAGNESIO, MICRONUTRIMENTOS Y HUMEDAD EN SUELO CON MAÍZ Y FRIJOL: MANEJO ORGÁNICO Y CONVENCIONAL..... 604

ESTIMAR LA DOSIS EFECTIVA DE BIOCARBÓN SUPLEMENTADO CON *Serratia* spp. EN EL CONTROL DE HONGOS ASOCIADOS A TRIGO (*Triticum aestivum* L.)..... 609

FERTILIDAD Y CALIDAD DE SUELOS EN FILOMENO MATA, TOTONACAPAN, VERACRUZ, MÉXICO 615

SUELOS CHERNOZEM Y AGRICULTURA TRADICIONAL EN ZONAS SEMIÁRIDAS ... 621

RETENCIÓN DE AGUA EN EL SUELO Y POTENCIAL RECARGA AL ACUÍFERO MEDIANTE SISTEMAS AGROFORESTALES EN GUANAJUATO 626

EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA Y EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN CULTIVO DE AMARANTO (*Amaranthus hypochondriacus*) 631

VANADIO EN LOS ESPACIOS VERDES URBANOS DE MORELIA: EVALUACIÓN BASADA EN LOS SUELOS..... 638

METALES PESADOS EN FLORES DESHIDRATADAS DE CEMPASÚCHIL CULTIVADAS EN ZONAS EXPUESTAS A CONTAMINANTES URBANOS E INDUSTRIALES..... 643

DINÁMICA DEL CARBONO EDÁFICO ANTE EL CAMBIO DE USO DE SUELO EN TLALPUJAHUA, MICHOACÁN, MÉXICO 648

EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA RESPIRACIÓN DEL SUELO: UN ESTUDIO DE SENSIBILIDAD 654

BASES PARA FOMENTAR LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE Y EN LOS SUELOS DEL PAÍS 661

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE SUELOS EN CD. UNIVERSITARIA DE MONTERREY NL: ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES Y METALES PESADOS 665

División V. Ciencias de Frontera y Multidisciplinarias del Suelo 670

ACTIVIDAD ENZIMÁTICA EN UN XEROSOL TRATADO CON NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE Y CULTIVADO CON MELÓN 671

APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ZNO EN LA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE SUSTRATOS CULTIVADOS CON PEPINO Y LECHUGA..... 677

ENCAPSULACIÓN DE UREA E INHIBIDOR BIOLÓGICO DE LA NITRIFICACIÓN CON ALGINATO 682

MANUFACTURA Y CARACTERIZACIÓN DE HIDROCARBÓN PROVENIENTE DE RESIDUOS TEQUILEROS: UNA ALTERNATIVA SOSTENIBLE PARA EL MEJORAMIENTO DE SUELOS AGRÍCOLAS 688

PLATAFORMA DE MONITOREO DE HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE IoT 694

SÍNTESIS BIOGÉNICA Y CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE SELENIO COMO POSIBLE NANOFERTILIZANTE EN PLANTAS DE MAÍZ NATIVO (*Zea mays* L.) 698

EFECTO DE UN NANOCOMPOSITO EN LA GERMINACION Y DESARROLLO DE PLÁNTULAS DE MAÍZ..... 703

ENSEÑANZA DE LA FÍSICA BÁSICA EXPERIMENTAL EN LAS CIENCIAS AGRÍCOLAS: CONSTRUCCIÓN DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA SIMULAR LA DENSIDAD APARENTE DEL SUELO..... 709

USO DE MODELOS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO EN LA EVALUACIÓN DE SUELOS AGRÍCOLAS DEL SURESTE DEL ESTADO DE COAHUILA 714

BIOFORTIFICACIÓN CON QUITOSANO-SELENATO: MEJORA DEL PERFIL NUTRICIONAL Y ANTIOXIDANTE EN GERMINADOS DE TRIGO (*Triticum spp*.) 719

FERTILIZACIÓN QUÍMICA CON NITROFOSKA PARA CALA LILY O ALCATRAZ AMARILLO (*Zantedeschia elliottiana* Engl.) 724

FORTALECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE CHILE JALAPEÑO MEDIANTE NANOPRIMING DE SEMILLAS: MEJORA DEL ESTABLECIMIENTO Y LA RESILIENCIA AL ESTRÉS..... 728

MOLECULAR DOCKING BETWEEN (E)-2-(4-FLUOROSTYRYL)-6-HYDRAZINEYLQUINOLINE SENSOR AND *Rhizoctonia solani* FOR ITS DETECTION AND MEASUREMENT IN AGRICULTURAL SOILS..... 734

División VI. Ecología del Suelo y Ciencias de la Tierra 738

INFLUENCIA DE FUENTES DE CARBONO EN LA COMUNIDAD DE RIZOBACTERIAS DE MAÍZ 739

DESCOMPOSICIÓN DE RESIDUOS VEGETALES EN BOSQUES TROPICALES SECOS DEL NOROESTE DE MÉXICO: COMPARACIÓN ENTRE SECO-FRÍO Y TRANSICIÓN SECO-HÚMEDO 745

d^{15}N y C:N REVELAN TRAYECTORIAS DESACOPLADAS EN MANTILLO Y SUELO TRAS UNA QUEMA PRESCRITA 751

DIVERSIDAD Y FUNCIONALIDAD DE CIANOBACTERIAS ASOCIADAS A COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO EN MÉXICO 756

ESTABILIDAD TÉRMICA DE LA MOS BAJO UN GRADIENTE DE ARIDEZ EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO 761

LIBERACIÓN DE ARSÉNICO DURANTE LA DESCOMPOSICIÓN *IN SITU* DEL SARGAZO 766

BIODIVERSIDAD DE NEMÁTODOS DEL SUELO DE CONSERVACIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO 770

CONSORCIOS BACTERIANOS CON PROMOCIÓN DE CRECIMIENTO VEGETAL Y SU EFECTO EN EL CRECIMIENTO EN JITOMATE (*Solanum lycopersicum*) 775

ESTRUCTURA DE LAS COMUNIDADES DE PROTOZOOS EN ECTOMICORRIZAS NATIVAS INOCULADAS EN *Pinus montezumae* 780

CÁSCARA DE NUEZ PECANERA EN LA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS DE CHILE JALAPEÑO 785

INTEGRATION OF PROCESS-BASED MODELS, MACHINE LEARNING AND MANAGED FOREST CHRONOSEQUENCE ON SOIL CARBON ESTIMATIONS 790

CORRELACIONES AMBIENTALES Y APLICACIONES DE LA TST EN EL TRÓPICO SECO DEL NORTE DE MÉXICO 796

COMPOSICIÓN IÓNICA Y CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LAS AGUAS DEL LAGO CRÁTER ATEXCAC, PUEBLA 800

DETERMINACIÓN DE MADUREZ DE VERMICOMPOSTA MEDIANTE CROMATOGRAFÍA CIRCULAR DE PFEIFFER 806

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA FOTOSINTÉTICA DE LA ACELGA CULTIVADA EN ZEOLITA BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO 812

IMPACTO DEL USO DEL AGUA DEL RÍO SALADO EN LA AGRICULTURA, HIDALGO 817

ACTIVIDAD DE MICROORGANISMOS RIZOSFÉRICOS DE PLANTAS DE café (*Coffea arabica* var. "Marsellesa") 823

CARACTERIZACIÓN DE LA NEMATOFAUNA EN COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO EN SITIOS CON MANEJO EN UN SEMIDESIERTO MEXICANO 829

BIOSÓLIDOS, UNA ALTERNATIVA AGROECOLÓGICA EN EL CULTIVO DE GARBANZO 834

CONTAMINACIÓN DE GLIFOSATO EN SUELOS CAÑEROS EN PASO DE OVEJAS, VERACRUZ 841

DIAGNÓSTICO DE CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO TULA Y LA PRESA ENDHÓ PARA RIEGO AGRÍCOLA 846

IMPACTO DE CAMBIOS EN EL REGÍMEN DE FERTILIZACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO DE AVENA Y ACTIVIDAD MICROBIANA DEL SUELO 852

ESTRUCTURA DE LA COMUNIDAD DE MICROARTRÓPODOS EDÁFICOS EN UN GRADIENTE ALTITUDINAL EN UN BOSQUE SECO EN ACÁMBARO, GUANAJUATO, MÉXICO 857

EVALUACIÓN EDAFOECOLÓGICA EN AGROECOSISTEMAS CON DISTINTOS AÑOS DE PLASTICULTURA EN EL DESIERTO SONORENSE 862

INOCULACIÓN DE *AGAVE SALMIANA* CON HONGOS MICORRIZÓGENOS ARBUSCULARES y *Azospirillum brasilense* EN CONDICIONES DE INVERNADERO 867

EFECTO DE LA COBERTURA DE RASTROJO EN EL RENDIMIENTO DEL TOMATE CHERRY BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO 872

IMPACTS OF NANOPLASTIC SOIL POLLUTION ON BIOLOGICAL NITROGEN FIXATION AND PHYSIOLOGY OF *GLYCINE MAX* INOCULATED WITH *Bradyrhizobium diazoefficiens* 877

HUELLA HÍDRICA DEL ARROZ EN SISTEMAS AGRÍCOLAS BAJO ESTRÉS HÍDRICO DEL SUELO, MICHOACÁN, MÉXICO 883

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) Y pH DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CUENCA DEL RÍO PÁNUCO 888

El Suelo: Pasado, Presente y Futuro de la Vida

División I. Los suelos en el espacio y tiempo

CLASIFICACIÓN DE LOS ANDOSOLS BAJO DIFERENTES SISTEMAS AGROFORESTALES EN ZACATLÁN, PUEBLA

Jonathan Omar Hernández Ordoñez[1]; Ma. Del Carmen Gutiérrez Castorena[1]; Carlos Alberto Ortiz Solorio[1]

[1] Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km 36.5 Carretera México-Texcoco. Montecillo, CP. 56264, Texcoco, Estado de México. México.

Correo del autor de correspondencia: ordonez.jonathan@colpos.mx

RESUMEN

La intervención humana ha generado cambios en las propiedades físicas, químicas, macro y micromorfológicas de los Andosols; sin embargo, las repercusiones que estos cambios han provocado en los procesos de formación y evolución de los horizontes de diagnóstico, principalmente en los sistemas agroforestales con distintos métodos de gestión, han sido escasamente estudiadas. La investigación se llevó a cabo en Andosols del municipio de Zacatlán, Puebla, donde existen sistemas agroforestales con distintos manejos: orgánico (Mo) e inorgánico (Mi), los cuales pueden estar sometidos a sistemas de labranza convencional (LC) o mínima (LM). Los suelos de cada sistema fueron caracterizados; además, muestras de suelos de cada horizonte de los perfiles del suelo fueron colectadas y llevadas al laboratorio. Posteriormente, a cada muestra de suelos se determinaron las características edáficas y los suelos de cada sistema se clasificaron con el sistema de clasificación Taxonomía de Suelos y la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Los resultados mostraron que en el bosque se observan diferentes grados de descomposición de raíces y hojas, mientras que en los sistemas agroforestales con manejo orgánico se aprecia una mayor influencia de la fauna edáfica. Las actividades humanas han modificado las propiedades de los epipedones, lo que influye en la ocurrencia de procesos de formación como la andosolización y la antrosolización. Lo anterior permite concluir que la influencia humana en los sistemas agroforestales modifica los horizontes de diagnóstico y, por lo tanto, la clasificación de los suelos.

PALABRAS CLAVE: *Andosolización, bosque de pino-encino; factor antropogénico; labranza convencional y mínima.*

INTRODUCCIÓN

La degradación del suelo es un problema grave, debido a la deficiente gestión de tres actividades: la deforestación, el sobrepastoreo y la agricultura mecanizada (o semimecanizada convencional) y la agricultura tradicional (Gliessman, 2002); así como la excesiva incorporación de agentes nitrogenados (McIsaac, 2001) o fosfatados que, entre otros factores, generan una constante pérdida de calidad del suelo (Brady y Weil, 1999).

El sistema agroforestal es un término ampliamente utilizado cuando el uso del suelo consiste en una combinación de árboles, animales y cultivos agrícolas en una disposición espacial y temporal (Wilson y Lovell, 2016). La agroforestería es una alternativa para

mejorar los sistemas agrícolas y proteger el medio ambiente. En México, esta práctica se lleva a cabo desde la época precolombina (Krishnamurthy y Ávila, 1999).

Los Andosols son uno de los grupos de suelos de referencia con mejores propiedades para la producción agrícola en el mundo y una excelente opción para la implementación de sistemas agroforestales. Sin embargo, estos suelos tienen un origen azonal, lo que representa un problema, ya que se asocian principalmente a materiales volcánicos y al relieve de zonas montañosas.

Algunos trabajos en Andosols de México han evaluado los niveles de erosionabilidad (Velásquez *et al*., 2006), monitoreado el escurrimiento superficial (Tapia-Vargas *et al*., 2001) y evaluado la calidad del suelo (Muñoz-Villalobos *et al*., 2011; Fuentes *et al*., 2009). Sin embargo, estudios que aborden la clasificación como fuente principal para evaluar la calidad, la función y la evolución de los suelos, son escasos (Prado *et al*., 2007). Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue determinar los procesos pedogenéticos de los Andosols dentro de distintos sistemas agroforestales y bajo diferentes sistemas de gestión en Zacatlán, Puebla.

MATERIALES Y MÉTODOS

El municipio de Zacatlán se localiza en la región de la Sierra Norte, en el estado de Puebla, México, entre los paralelos 19° 50' 06" y 20° 08' 12" N y los meridianos 97° 51' 06" y 98° 12' 36" W; con una elevación que oscila entre los 1,120 y los 2,860 msnm. El clima predominante es C(m) y C(w2): templado húmedo con abundantes lluvias en verano, con una temperatura media anual de 14.5 °C y precipitaciones medias anuales de 1,076 mm. La vegetación está constituida principalmente por bosques mesófilos de montaña y bosques de pino y encino. Los suelos predominantes son Andosols, Luvisols y Cambisols (INEGI, 2021; INEGI, 2014).

Los sitios seleccionados en sistemas agroforestales (sitio 7, bosque natural; sitio 1, 2, 3 y 5, Mo con LM; sitio 8 y 10, Mo con LC; sitio 4, 6 y 9, Mi con LC) se localizan en dos localidades, Atzingo y Poxcuatzingo, situadas al norte de la cabecera municipal. Recorridos de campo y entrevistas a productores fueron realizados y se registró la existencia de degradación. En cada localidad se excavaron pozos pedológicos y se describieron según el manual de Cuanalo (1990). De cada uno de los horizontes, se colectaron muestras de suelo para su análisis.

Las determinaciones químicas que se realizaron fueron: pH, MO, retención de fosfatos, CIC, cationes intercambiables, Al y Fe por oxalato ácido. Las características físicas fueron: proporción relativa del tamaño de partícula, color, densidad aparente y retención de humedad. Las determinaciones físicas y químicas se realizaron de acuerdo con los criterios del Manual de Procedimientos de van Reeuwijk (2002). Para el porcentaje de vidrio volcánico (VV), se utilizó la fracción de arena media (Bullock *et al*., 1985). Estas características y propiedades edáficas se utilizaron para clasificar a los suelos con base a las Claves para la Taxonomía de Suelos (SSS, 2022) y la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Working Group WRB, 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tiempo en el que se han manejado los suelos en los sistemas agroforestales varía de 2 a 50 años. La combinación de factores de formación como el relieve, el material parental, la vegetación (organismos), el tiempo y el tipo de manejo que se realiza ha generado cambios en la adición y transformación de sus componentes edáficos, lo que se refleja en la clasificación de los suelos. Por ejemplo, los sitios se ubicaron en zonas con pendientes que van de 20 a 45° (zonas donadoras activas), con excepción del sitio 2 (zona pasiva), el cual se localiza sobre una meseta; es decir, con relieves diferentes. En cambio, el material parental puede considerarse como constante, ya que los suelos se originaron principalmente en cenizas volcánicas de naturaleza vítrea básica (sideromelana). Mientras que, la vegetación dominante es de bosques de pino-encino, lo que coincide con lo expuesto por otros autores (McDaniel *et al.,* 2012). Todos los sitios presentan propiedades ándicas, es decir, % Alox + ½ % Feox ≥ 2, ≥ 5% de vidrio volcánico, ≥ 25% de retención de fosfatos y una densidad aparente ≤ 0.90 g $\cdot cm^{-3}$, según los requisitos establecidos por el SSS (2022).

Los análisis físicos mostraron, en general, que los suelos tienen una textura franca limosa y franca, con densidades aparentes bajas. Los colores de los suelos son pardos oscuros cuando están húmedos y pardos grisáceos cuando están secos. El material parental es el responsable de su coloración. Los suelos con bosque natural (sitio 7) acumulan materia orgánica con diferentes grados de descomposición (Oa, Oe y Oi) y reúnen los requisitos para ser considerados un epipedón folístico.

Por otro lado, la incorporación de enmiendas orgánicas e inorgánicas y un incremento de las bases intercambiables (PSB) > 50% generaron un epipedón hórtico (sitios 5, 6). La segunda tendencia en la evolución de los epipedones se dio cuando el horizonte O (epipedón folístico) se mezcló con la capa superficial (horizonte A) y se añadieron al suelo enmiendas orgánicas y arado (sitio 2). Este proceso generó un horizonte Ap derivado de la alteración por las actividades humanas. En algunos lugares (sitio 3), las fuertes pendientes y la eliminación de la vegetación provocaron la degradación de los suelos y, por consiguiente, la pérdida de los horizontes O y A.

La modificación o evolución de los procesos pedogenéticos ha generado que los suelos cambien en su clasificación. Por ejemplo, con las Claves para la Taxonomía de Suelos (SSS, 2022), los suelos con bosque natural (sitio 7) se designaron como Typic Melanudands, por sus altos contenidos de materia orgánica, colores oscuros o como Hydric Pachic Melanudands (sitio 1) adicionando sus altos contenidos de humedad. Las pérdidas considerables en los contenidos de materia orgánica generaron que los suelos se clasificaran como Hydric Hapludands (sitio 2). También se clasificaron como Eutric Hapludands cuando se han incorporado enmiendas tanto orgánicas como inorgánicas (incremento PSB > 50% en sitios 5 y 6). Finalmente, en el resto de los sitios (3, 4, 8, 9 y 10) los suelos fueron clasificados como Typic Hapludands, al no presentar más características que los describieran.

Por otro lado, la clasificación de los suelos con la WRB (IUSS Working Group WRB, 2022) representa de manera más detallada todas las características y procesos

pedogenéticos presentes en cada sitio. Por ejemplo, el suelo del bosque natural (sitio 7) se designó como Dystric Vitric Silandic Andosols (*Siltic, Folic, Hiperhumic*) debido principalmente a sus horizontes de diagnóstico y a sus propiedades ándicas. Con la disminución drástica en el contenido de CO y horizonte orgánico, los calificadores principales se modificaron de Folístico a Umbrico y en consecuencia la designación fue a Dystric Umbric Vitric Silandic Andosols (*Siltic, Humic*) (sitios 2 y 4). Cuando no ocurre alguno de los dos procesos anteriores, los suelos se clasifican como Dystric Vitric Silandic Andosol (*Siltic, Profundihumic*) (sitio 1) o bien como Dystric Vitric Silandic Andosol (*Siltic, Humic*) (sitio 3, 8, 9 y 10).

Otro grupo de suelos que se presentan son los Andic Hortic Anthrosols (*Siltic, Dystric, Vitric*) (sitios 5 y 6). En este sentido, la clasificación de los suelos está determinada por el manejo, ya sea orgánico o inorgánico, y la aplicación de mejoradores del suelo. En cuanto a la macromorfología de los suelos forestales de la zona de estudio, está dominada por agregados migajosos y granulares. Estos rasgos son abundantes en los horizontes orgánicos y superficiales, como resultado de la actividad biológica (Kooistra y Pulleman, 2010; Bronick y Lal, 2005; Bullock *et al.,* 1985). Con el cambio de uso de la tierra, este tipo de agregados disminuye hasta un 50% en los suelos con Mo (sitios 1 y 2) e incluso hasta un 75% con Mi (sitio 6). Otra característica importante que se observó en los lugares de estudio fue la estructura de bloques subangulares, que implica una degradación de la estructura debido a la disminución del contenido de materia orgánica tanto en labranza convencional como en labranza cero (Cássaro *et al.*, 2011).

CONCLUSIONES

La gestión de los diferentes sistemas agroforestales del municipio de Zacatlán, Puebla, ha generado cambios en los procesos pedogenéticos, como la andosolización, la melanización y la antrosolización. Los diferentes tipos de manejo modificaron las características, propiedades y materiales de diagnóstico, por lo cual la designación de los horizontes de diagnóstico y, en consecuencia, su clasificación científica cambió. El estudio de los factores y procesos de formación del suelo que generan la intervención antropogénica sobre la clasificación de este recurso finito abre un amplio panorama de investigación en la actualidad. La comprensión de dichos factores y procesos permite predecir tendencias y prevenir futuros problemas relacionados con el suelo y su entorno.

BIBLIOGRAFÍA

Brady, C.N. & Weil, R.R. (1999). The nature and properties of soils. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.

Bronick, C. J. & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma.* 124:3-22.

Bullock, P., Jongerius, A., Tursina, T., Federoff, N., Stoop, G. & Babel, U. (1985). Manual para la descripción micromorfológica de suelos. Traducción de Gutiérrez-Castorena, M.C. & Ortiz-Solorio, C.A. 1999. Programa de Edafología. Colegio de Postgraduados Montecillo. Texcoco, México.

Cássaro, F.A.M., Borkowski, A.K., Pires, L.F., Rosa, J.A., Saab, S. & Da, C. (2011). Characterization of a Brazilian clayey soil submitted to conventional and no-tillage management practices using pore size distribution analysis. *Soil Tillage Res*. 111: 175–179.

Cuanalo de la C., H. (1990). Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. 3a ed. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Fuentes M., Govaerts, B., De León, F., Hidalgo, C., Dendooven, L., Sayre, K. & Etchevers. J. (2009). Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *European Journal of Agronomy*.

Gliessman, S.R. (2002). Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible. Turrialcaba, C. R.: CATIE, 359 p.

INEGI. (2014). Conjunto de datos vectoriales edafológico, escala 1:250000 Serie II. (Continuo Nacional), escala: 1:250000. edición: 2. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags., México.

INEGI. (2021). Conjunto de Datos Vectoriales de Uso de Suelo y Vegetación. Escala 1:250 000, Serie VII. Conjunto Nacional, escala: 1:250 000. Edición: 1. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Viena, Austria.

Kooistra, M. J. & Pulleman, M.M. (2010). Features related to fauna activity. In: Stoops G., Marcelino V. & Mees F. (eds.) Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths. Elsevier. 752 p.

Krishnamurthy, L. & Ávila, M. (1999). Agroforestería básica. Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe. México, D.F.

McDaniel, P.A., Lowe, D.J., Arnalds, O. & Ping, C.L. (2012). Classification of Soils: Andisols. In: Huang P.M, Li Y. & Sumner M.E. (eds). Handbook of Soil Sciences. 2nd edn (Volume 1: Properties and Processes; Volume 2: Resource Management and Environmental Impacts). Published by CRC Press, Boca Raton, FL. 2155 pp.

McIsaac, G.F., David, M.B., Gertner, G.Z. & Goolsby, G.A. (2001). Eutrophication: Nitrate flux in the Mississippi River. Nature, 414, 166–167.

Muñoz-Villalobos, J., Oleshcko-Lutkova, K., Velásquez-Valle, M., Velázquez-García, J., Martínez-Menes, M. & Figueroa-Sandoval, B. (2011). Propiedades físicas de un Andosol módico bajo labranza de conservación. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 1:151-162.

Prado, B., Duwig, C., Hidalgo, C., Gómez, D., Yee, H., Prat, C., Esteves, M. &, Etchevers, J.D. (2007). Characterization, functioning and classification of two volcanic soil profiles under different land uses in Central Mexico: *Geoderma*, 139, 300–313.

SSS. Soil Survey Staff. (2022). Keys to Soil Taxonomy, 13th edition. USDA Natural Resources Conservation Service.

Tapia-Vargas, M., Tiscareño-López, M., Stone, J., Oropeza-Mota, J.L. & Velázquez-Valle, M. (2001). Tillage system effects on runoff and sediment yield in hillslope agriculture. *Field Crops Research,* 69: 173-182.

van Reeuwijk L.P. (2002). Procedimiento para Análisis de Suelos. Versión 1995. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena, Carlos A. Tavares E. y Carlos A. Ortiz Solorio (Trads.). Primera Edición en Español, 1999. Especialidad de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 145.

Velázquez-Valle, M.A., Martínez-Menes, M.R., Bravo-Espinosa, M., Velázquez-García, J.J., Potter, K.N. & Tiscareño-López, M. (2006). Erosionabilidad acanalada de un Andosol en dos sistemas de labranza en la Meseta Tarasca Michoacán. *Terra Latinoamericana,* 24: 119-123.

Wilson M.H. & Lovell, S.T. (2016). Agroforestry-The next step in sustainable and resilient agriculture. Review. MDPI. *Sustainability*. 8: 574.

EVALUACIÓN DE LA GESTIÓN AGRÍCOLA DE LOS SUELOS DEL COLEGIO DE POSTGRADUADOS CAMPUS MONTECILLO

Mariana Tovar Castañón[1]; Nicolás Martínez Maroto[1]; Mitzi del Rosario Lupián Machuca[1]; Ismael Rivera Ramirez[2]; Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena[1]; Carlos Alberto Ortiz Solorio[1]

[1] Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco Km 36.5, CP. 56230. Texcoco de Mora, Estado de México, México.
[2] Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186. Col. Leyes de Reforma 1ª sección, CP. 09310. Alcaldía Iztapalapa, Ciudad de México, México.

Correo del autor de correspondencia: tovar.mariana@colpos.mx

RESUMEN

En este trabajo se evaluaron los cambios morfológicos, físicos y químicos de las series de suelos correspondientes al levantamiento de suelos del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, que ocurrieron en los últimos 13 años (2012 y 2025), sobre todo en los suelos agrícolas. Los resultados de campo mostraron modificaciones notables como transición de agregados subangulares a prismáticos, formación de pisos de arado, presencia de costras, variaciones en la secuencia y espesor de horizontes. En las series Canal, Corrales y Durazno se incorporaron rasgos no registrados en la evaluación previa, lo que evidencia una evolución condicionada por el manejo agrícola. El análisis comparativo reveló un aumento generalizado del pH, indicando una tendencia hacia mayor alcalinidad. El carbono orgánico del suelo disminuyó en todas las series, reflejando pérdida de materia orgánica. La densidad aparente se incrementó en la mayoría de los suelos, sugiriendo una compactación progresiva. Estos cambios implican una reducción de la porosidad efectiva y potenciales limitaciones para el desarrollo de cultivos. Lo anterior confirma que el uso agrícola intensivo y el uso de maquinaria agrícola, pueden alterar la estructura y funcionalidad del suelo. La evidencia respalda la necesidad de estrategias de manejo orientadas a conservar la porosidad, mantener la materia orgánica y minimizar la compactación, asegurando la productividad y sustentabilidad del recurso edáfico a largo plazo.

PALABRAS CLAVE: A*nálisis de suelos, compactación, descripción de perfiles.*

INTRODUCCIÓN

En sistemas agrícolas intensivos, las modificaciones morfológicas, físicas y químicas derivadas de las prácticas de gestión pueden alterar la funcionalidad y la capacidad productiva del suelo. Hamza y Anderson (2005) señalan que la densidad aparente, el pH y el contenido de carbono orgánico son indicadores clave para evaluar los cambios en la calidad del suelo con fines agrícolas. Asimismo, se ha documentado que las intervenciones mecánicas, como el subsoleo, pueden modificar atributos fundamentales como la porosidad y la estabilidad estructural (Keller *et al.,* 2021). En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue comparar las propiedades edáficas de las series

de suelos de uso agrícola del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, que se encontraron en el año 2012, con las que se determinarían en el 2025 (13 años después), con el fin de identificar los efectos del manejo de suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio de estudio se ubicó en el Colegio de Postgraduados, campus Montecillo en Texcoco, Estado de México, cuyas coordenadas extremas son 19°27'30" N y 98°53'40" W y 19° 28' 10'' N y 98°55'30" W, a una altitud de 2210 msnm. El colegio tiene una extensión aproximada de 200 ha. La zona se encuentra sobre depósitos piroclásticos del Cuaternario, caracterizándose por la presencia de materiales volcánicos y lacustres (Siebe *et al*., 1996) derivados del Ex–Lago de Texcoco. Este último fue un cuerpo salobre que se encontraba en el centro de la Cuenca de México (Carranza-Edwards, 2018) que, junto a los lagos de Xochimilco, Chalco y Zumpango, conformó un gran sistema lacustre, principalmente salino (Toole, 2019).

Como antecedente, se tuvieron en cuenta los datos generados en el levantamiento de suelos realizado en 2012 (González *et al.,* 2012), en el que se identificaron siete series de suelos de uso agrícola. Esas mismas series se analizaron nuevamente, por lo que se analizó la descripción de un perfil modal de esos suelos y se recopiló información sobre el uso del suelo y descripciones del paisaje. Los suelos se describieron morfológicamente según el Manual para la descripción de perfiles de suelos de Gutiérrez-Castorena (2025) y se clasificaron conforme a la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (IUSS Working Group, 2022). Por otra parte, se realizó un muestreo sistemático de 35 puntos cada 200 m del suelo superficial para analizar sus propiedades químicas. En cada muestra se obtuvo la conductividad eléctrica (CE) [pasta de saturación], el pH en agua (2:1), la densidad aparente (Da) [método del terrón parafinado] y el carbono orgánico (CO) [Walkley-Black], según se indica en el manual de Van Reeuwijk (1999). Por último, se actualizó la información correspondiente a la clasificación de cada perfil típico de cada serie y se comparó con la información de 2012 para establecer las diferencias y evaluar la calidad del suelo de cada sitio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La horizonación del suelo en los años de estudio fue similar. En cambio, el espesor de los horizontes, así como la estructura, Da, pH y contenido de CO tuvieron variaciones con respecto a las características y propiedades observadas en 2012, principalmente relacionadas con el manejo agrícola.

Los Grupos de Referencia de suelos (WRB, 2022) que se encontraron en las series de suelo son variados, en las series Canal y Duraznos en la superficie ocurren Phaeozems, pero a partir de los 60 cm, los suelos se pueden clasificar como Anthrosols enterrados, debido a que se identificaron diferentes tipos de rellenos, abundantes fragmentos de cerámica e incluso restos humanos (tumbas prehispánicas), los cuales se relacionan con la antigua ribera del ex lago de Texcoco y asentamientos humanos. Por su parte, las series Corrales y Estación solo presentan Phaeozems; mientras que, en las series Lago y Montecillo, en su fase típica, se encuentran los Solonchacks (Figura 1). Asimismo, la serie

Canal está formada por suelos profundos constituidos por siete horizontes con la siguiente secuencia: Ap-2Bd-3Bw-4Bw-5Bwu-6BCu-7Bgu (Figura 2). Debido a que los horizontes subsuperficiales no corresponden a horizontes genéticos enterrados, no se designaron con el subfijo *b*, pero sí se incorporó la *u* para denotar la presencia de artefactos. Además, el subsoleo profundo ha modificado agrícolamente hasta el horizonte B, de ahí que se le designara con el sufijo *p*. En estos suelos se presentan costras superficiales de 1 cm de espesor con poros tipo vesícula y un piso de arado dentro de los primeros 20 cm de la superficie. Esto reduce la infiltración de agua y favorece la escorrentía y la erosión, además de limitar la emergencia de plántulas (Alonso-Báez *et al.*, 2023). La estructura actual es de bloques subangulares a prismas, una estructura que no se había registrado anteriormente en esta serie. La transición de bloques subangulares a prismas coincide con lo descrito por Vorotyntseva *et al.* (2021), quienes atribuyen este tipo de modificación a la disminución de la materia orgánica, factor que reduce la estabilidad de los agregados y, en presencia de texturas arcillosas, favorece la formación de agregados más densos.

La serie Duraznos presenta suelos profundos formados por sedimentos aluviales, constituidos por cinco horizontes con la siguiente secuencia: Apu-Aud-2ABwu-3Bwu1-3Bw2 (Figura 2). Este perfil también presenta un aumento en la Da conforme se incrementa su profundidad (Cuadro 1), lo que provocó la aparición de un piso de arado que limita el crecimiento de las raíces y se establece como una barrera física que las obliga a expandirse horizontalmente para continuar su desarrollo. Esta característica limitante se ha ido formando con el paso de los años, ya que no se encontraba presente en el estudio anterior. Este crecimiento particular de las raíces coincide con lo descrito por Sun *et al.* (2023), quienes mencionan que, debido a la compactación del suelo, la Da aumenta. En el presente estudio, este valor pasó de 1.35 g cm^{-3} en 2012, considerado bajo, a 1.45 g·cm^{-3}, clasificado como moderado según Hanzelton y Murphy (2007).

La serie Corrales está formada por los suelos que han experimentado mayores cambios, resultado de un subsolado profundo que alteró la secuencia original de horizontes descrita anteriormente. Esta práctica tenía como objetivo romper una capa limitante de ceniza volcánica endurecida y otra de sedimento lacustre conocido localmente como «jaboncillo», que se encontraba a una profundidad de los primeros 50 cm. En la actualidad, está constituido por nueve horizontes con la siguiente secuencia: Ap-B-2B-3C-4Bq-5LB-6C-7LBt-7BLtg (Figura 2). Según Hamza y Anderson (2005), los beneficios de estas prácticas pueden disminuir con el tiempo si no van acompañadas de metodologías que mantengan la porosidad, la cual, ya se encuentra comprometida. De hecho, los suelos estudiados presentan rasgos característicos, como horizontes con transiciones onduladas y abruptas. Predomina la estructura prismática y apedal de tipo ahuecado en gran parte del suelo, cuya porosidad principal carece de conectividad. Esto concuerda con lo descrito por Keller *et al*. (2021), quienes señalan la pérdida de estabilidad estructural cuando no hay aporte de materia orgánica. En el Cuadro 1 se puede observar una disminución de la materia orgánica en todas las series. En la serie Montecillo, se observó que el suelo estaba sellado y todavía estaba seco a pesar de las intensas lluvias registradas. El sellamiento favorece la escorrentía y genera zonas anegadas en la serie de

canales, donde la baja estabilidad de los agregados provoca grietas y costras mecánicas de más de 2 cm de espesor.

Las Series de suelo Estación, Lago, Montecillo Fase Dorada y Fase Típica presentaron variaciones en el espesor de sus horizontes, evidenciando modificaciones morfológicas respecto a la descripción previa. Estos cambios se ilustran en la Figura 2 con diferentes secuencias de horizontes.

En términos generales, la comparación de las series de suelos entre 2012 y 2025 de los horizontes superficiales mostró un incremento del pH, lo que indica una tendencia hacia condiciones más alcalinas con el paso del tiempo. El contenido de carbono orgánico disminuyó de manera constante, lo que refleja una pérdida de materia orgánica durante el período de evaluación. En cuanto a la densidad aparente, se observó un aumento en tres series, lo que sugiere un proceso de compactación progresiva asociado a las prácticas agrícolas y al uso intensivo del suelo (Cuadro 1).

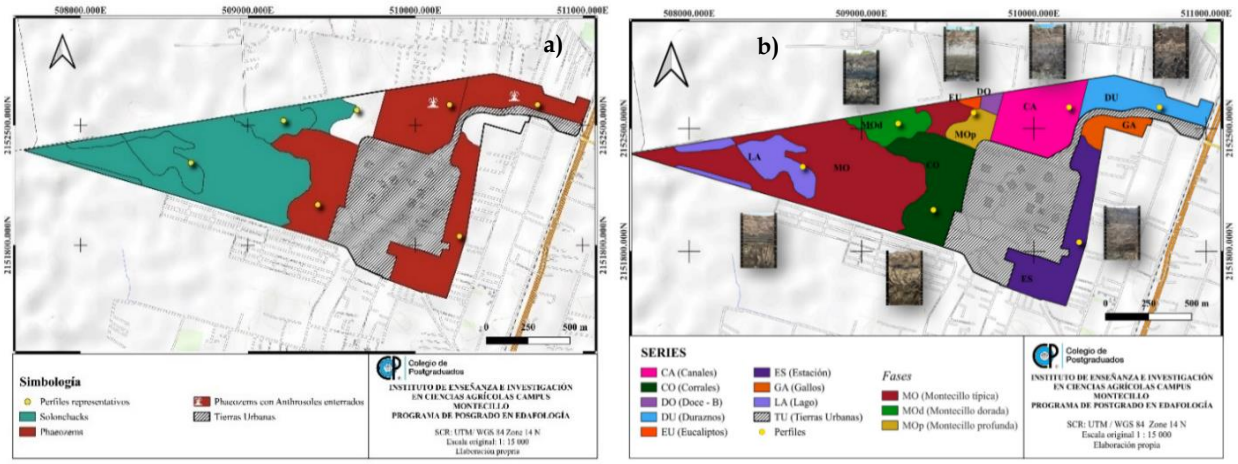


Figura 1. a) Grupo de Suelos Solonchacks y Phaeozems en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo; b) Perfiles representativos para cada serie, se observa Serie Canal, Serie Corrales, Serie Duraznos, Serie Estaciones, Serie Lago, Serie Montecillo Fase Dorada, Serie Montecillo Fase Típica.

Cuadro 1. Promedio de propiedades de muestras superficiales tomadas cada 200 metros a partir de la descripción de perfil de 2012 y 2025 correspondientes a cada serie.

Serie	2012						2025					
	Da	Ev.	pH	Ev.	CO	Ev.	Da	Ev.	pH	Ev.	CO	Ev.
	(g cm^{-3})		(1:2)		(%)		(g cm^{-3})		(1:2)		(%)	
Canal	1.30	B	7.80	LA	1.74	Mo	1.29	B	8.65	FA	0.99	B
Corrales	1.33	B	8.10	MA	2.20	A	1.23	B	8.90	FA	1.22	Mo
Duraznos	1.35	B	7.60	LA	1.98	Mo	1.45	Mo	8.53	FA	0.85	B
Estación	1.28	B	7.45	LA	0.90	B	1.45	Mo	8.10	Mo	0.99	B
Lago	1.46	Mo	9.40	EA	0.95	B	1.26	B	9.20	EA	1.03	Mo
Montecillo	1.09	B	9.90	EA	1.98	A	1.44	Mo	9.70	EA	0.95	B

Da = Densidad aparente; CO = Carbono Orgánico; Ev. = Evaluación; B = Baja; Mo = Moderado; A = Alta, LA = Ligeramente alcanina, MA = Moderadamente alcalina, FA = Fuertemente alcalina, EA = Extremadamente Alcalina.

CONCLUSIONES

Las prácticas agrícolas han provocado cambios estructurales y han alterado propiedades importantes, lo que se evidencia en un incremento de valores de pH extremadamente alcalinos, un aumento de la densidad aparente asociado a procesos de compactación y sellamiento, y una disminución del contenido de materia orgánica. Aunque los subsoleos se han llevado a cabo en los últimos años, los pisos de arado siguen estando presentes. Estos cambios reflejan un deterioro progresivo de la calidad del suelo en un período de 13 años, lo que subraya la necesidad de adoptar prácticas que preserven su estructura y funcionalidad.

BIBLIOGRAFÍA

Alonso-Báez, M. (2023). Mejoramiento de las propiedades hidráulicas del suelo en el cultivo de soya mediante el subsuelo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas,* 14(5), 78-89. 10.29312/remexca.v14i5.3102.

Carranza-Edwards, A. (2018). Correlación litológica del subsuelo del lago de Texcoco. *Hidrobiológica,* 28(1), 93-101. 10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2018v28n1/Carranza

González, L., Ortiz-Solorio, C.A. & Gutiérrez-Castorena, M.C. (2012). Los suelos del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Texcoco, Edo. México.

Gutiérrez-Castorena, M.C. (2025). Manual para la descripción de perfiles de Suelo. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. México.

Hamza, M. & Anderson W. (2005). Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research,* 82(2), 121–145. 10.1016/j.still.2004.08.009

Hazelton, P., & Murphy, B. (2007). Interpreting Soil Test Results. ISBN 978 0 64309 225 9.

IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps (4th ed.). International Union of Soil Sciences (IUSS). https://www.isric.org/explore/wrb

Keller, T., Colombi, T., Ruiz, S., Schymanski, S., Weisskopf, P., Koestel, J., Sommer, M., Stadelmann, V., Breitenstein, D., Kirchgessner, N., Walter, A. & Or, D. (2021). Soil structure recovery following compaction: Short-term evolution of soil physical properties in a loamy soil. *Soil Science Society of America Journal,* 85:1002–1020. 10.1002/saj2.20240

Siebe, C., Rosales-Lagarde, L. & Schaaf, P. (1996). Late Holocene paleoenvironments of the former lake Texcoco. *Quaternary Research,* 46(1), 65–75. https://doi.org/10.1006/qres.1996.0043

Sun, Q., Sun, W., Zhao, Z., Jiang, W., Zhang, P., Sun, X. & Xue, Q. (2023). Soil Compaction and Maize Root Distribution under Subsoiling Tillage in a Wheat–Maize Double Cropping System. *Agronomy,* 13 (2). 10.3390/agronomy13020394.

Toole, E.V. (2019). Palaeoenvironmental and palaeogeographic reconstruction of the Te-quixquiac Basin, Central Eastern Mexico: Mid to late Pleistocene environments. (Docthoral thesis). Liverpool John Moores University (United Kingdom).

Van-Reewick, L.P. (2002). Procedures for soil analysis. International Soil Reference and Information Center. 6aed. Wageningen, The Netherlands.

FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA PARA LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE AGUA EN TRES SUELOS DE LA SUBCUENCA RÍO SAHUAYO

Estefanía Ramos Tamayo[1]; Gustavo Cruz Cárdenas[1]; Salvador Ochoa Estrada[1]; José Teodoro Silva García[1], Sergio Martínez Trinidad[2]; Sigifredo López Díaz[1]

[1] Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR-IPN-Michoacán, COFAA, Justo Sierra 28, col. Centro, CP. 59510. Jiquilpan, Michoacán, México.
[2] Colegio de Postgraduados, campus Puebla. Boulevard Forjadores de Puebla Núm. 205, Santiago Momoxpan, CP. 72760. San Pedro Cholula, Puebla, México.

Correo del autor de correspondencia: eramost2300@alumno.ipn.mx

RESUMEN

Las funciones de pedotransferencia (FPT) permiten estimar propiedades del suelo a partir de datos medibles, facilitando la gestión de los recursos naturales. Este estudio tuvo como objetivo determinar la capacidad de almacenamiento de agua y desarrollar FPT para tres grupos de suelo dominantes en la subcuenca del río Sahuayo: Leptosols, Luvisols y Vertisols. Se seleccionaron 18 perfiles en áreas agrícolas y no agrícolas, obteniendo 88 muestras cada 20 cm hasta 100 cm de profundidad. Se determinaron la proporción relativa del tamaño de partícula, densidad aparente (Da), materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE) y pH. Las propiedades hidráulicas, capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) se evaluaron a 0.3 y 15 atm, respectivamente. Además, se generaron curvas de retención de humedad (0.3, 0.5, 1.5, 5, 10 y 15 atm), y se calculó la capacidad de agua disponible (CAD) como la diferencia entre CC y PMP. Se utilizó un diseño factorial considerando tipo y uso de suelo como factores, y CAD como variable dependiente. Las FPT se desarrollaron mediante regresión múltiple y algoritmos de aprendizaje automático, utilizando el 70% de los datos para entrenamiento y el 30% para validación. El desempeño se evaluó con el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2). Se observó mayor CAD en Vertisols ($p<0.002$), sin diferencia significativa por uso de suelo. Las redes neuronales fueron el modelo más preciso, por ejemplo, la CC en Luvisol: $R^2 = 0.814$, RMSE = 0.022.

PALABRAS CLAVE: *Propiedades hidráulicas; retención de humedad; validación de modelos.*

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural esencial para la productividad agrícola y la sustentabilidad ambiental. Entre sus diversas funciones ecosistémicas, destaca la capacidad de retener y suministrar agua disponible para las plantas, la cual influye directamente en el crecimiento de los cultivos y en la eficiencia del uso del agua (Hatfield y Dold, 2019; Adhikari y Hartemink, 2016). La capacidad de agua disponible (CAD) se define como el agua que puede ser almacenada en el perfil del suelo (hasta la

profundidad radicular) entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) (Kukal *et al*., 2023).

La estimación precisa de la CAD no solo requiere conocer los valores de CC y PMP, sino también entender cómo varía la humedad del suelo ante diferentes presiones, lo cual se logra mediante las curvas de retención de humedad. Estas curvas permiten caracterizar el comportamiento hídrico del suelo y son clave para modelar la disponibilidad de agua (Bejar *et al*., 2020).

La obtención directa de las propiedades hidráulicas del suelo, como la CAD, puede ser limitada por su complejidad técnica, por lo que se requieren métodos ágiles basados en datos de fácil obtención (McBratney *et al*., 2018). En este contexto, las funciones de pedotransferencia (FPT) se han consolidado como herramientas eficaces para estimar propiedades hidráulicas del suelo a partir de variables fácilmente medibles, como la textura, materia orgánica o densidad aparente (Beniaich *et al*., 2023).

Las FPT se han desarrollado comúnmente mediante regresión múltiple; no obstante, su precisión ha mejorado con el uso de algoritmos de aprendizaje automático como bosques aleatorios (BA), máquinas de vectores de soporte (MVS) y redes neuronales artificiales (RNA) (Faouzi *et al*., 2023; McBratney *et al*., 2018).

El objetivo de este trabajo fue determinar la capacidad de almacenamiento de agua y generar funciones de pedotransferencia en tres suelos en la subcuenca del río Sahuayo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en la subcuenca del río Sahuayo, situada entre las coordenadas 102°29′ y 102°54′ al oeste y 19°49′ y 20°10′ al norte. Con base en la clasificación WRB, los suelos dominantes en la zona corresponden a Leptosols (Lithic), Luvisols (Vertic) y Vertisols (Pellic) (INEGI, 2009). En cada Grupo de Suelos de Referencia se seleccionaron seis sitios, en los cuales se excavaron pozos pedológicos (18 en total). En cada pozo (en la cara del perfil) se tomaron muestras de suelo a intervalos de 20 cm hasta una profundidad de un metro, haciendo un total de 88 muestras. En el laboratorio se determinó la proporción relativa del tamaño de partícula (textura), MO, Da, CE y pH, de acuerdo con las metodologías de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

La curva de retención de humedad (CRH) para cada muestra se obtuvo con el método del plato y membrana de presión, como se establece en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), a tensiones intermedias (0.3 0.5, 1.5, 5, 10 y 15 atm). La CC y PMP se establecieron a 0.3 y 15 atm, respectivamente.

La CAD se estimó como la suma del producto entre el espesor de cada capa (ΔZi) y la diferencia entre CC (FCi) y PMP (PWPi), utilizando la ecuación propuesta por Cousin *et al.* (2022).

Un diseño factorial de dos vías con ANOVA y prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) para comparar diferencias en la CAD promedio entre tipos de suelo, usos y su interacción.

Para estimar la CC y PMP mediante FPT, se aplicaron regresión múltiple y algoritmos de aprendizaje automático (BA, MVS y RNA), utilizando como variables predictoras la textura, Da, MO, CE y pH. El conjunto de datos se dividió en 70% para entrenamiento y

30% para validación de los modelos. El rendimiento de los modelos se evaluó mediante el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cada Grupos de Suelo tuvieron una CRH específica. Los Vertisols conservaron los mayores porcentajes de humedad a lo largo de todo el rango (ej. CC =65%, PMP=40%), seguidos por los Leptosols (CC=52%, PMP=31%) y los Luvisols (CC=37%, PMP=26%). Estas diferencias reflejan las características físicas y mineralógicas de cada suelo, como el alto contenido de arcillas expansivas y alta microporosidad en Vertisols, o la menor profundidad y presencia de fragmentos en Leptosols (Hernández *et al*., 2022; Mbayaki y Karuku, 2022).

Las curvas muestran que los suelos agrícolas tienden a retener un poco más de humedad que los suelos no agrícolas, aunque la diferencia es mínima, lo cual indica que el manejo agrícola no siempre modifica sustancialmente la capacidad de retención hídrica cuando las propiedades físicas son similares (Lince-Salazar, 2021; Moratelli *et al*., 2023).

Por otra parte, la CAD fue diferente entre Grupos de Suelo ($p < 0.001$), pero no por uso de suelo ni por interacción. Los Vertisols presentaron los valores más altos (26.1%), seguidos por los Leptosols (19.9%) y Luvisols (10.9%).

Esto se explica por la mineralogía y la estructura de los suelos. Los Vertisols, dominados por arcillas 2:1 expansivas (esmectitas), presentan elevada microporosidad y comportamiento de contracción–expansión, lo que amplía el rango entre CC y PMP y favorece el almacenamiento de agua (Çakir y Cangir, 2021). Los Leptosols retienen menos agua debido a su baja profundidad y contenido de fragmentos, pero favorecen la infiltración (Castellanos-Vargas *et al.,* 2017). En Luvisols, la iluviación de arcilla que da lugar al horizonte árgico concentra arcillas de alta actividad en el subsuelo; esto incrementa la densidad aparente y reduce la macroporosidad (Cantú Silva *et al.,* 2021; Mbayaki y Karuku, 2022).

Las FPT desarrolladas mostraron que el uso de algoritmos de aprendizaje automático mejoró la precisión de las estimaciones de CC y PMP en comparación con la regresión múltiple. La regresión múltiple permitió identificar patrones relevantes entre propiedades edáficas e hidráulicas, especialmente en Leptosols, donde la fracción arcillosa explicó más del 83% de la variabilidad en CC y PMP (Wang *et al.,* 2012). En Luvisols, la CE introdujo variabilidad negativa (Román-Dobarco *et al*., 2019), y aunque el ajuste para CC fue bajo ($R^2 = 0.39$), el modelo de PMP logró mejor desempeño $R^2 = 0.84$. En Vertisols, el ajuste para CC pasó de $R^2 = 0.37$ a 0.75 al realizar un análisis adicional sin los perfiles con salinidad y pH elevados, con el fin de reducir la variabilidad extrema y evaluar el comportamiento del modelo en condiciones más homogéneas. Este análisis complementario mostró que dichas condiciones, tal como señalan Zhang *et al*. (2024), tienen un efecto negativo sobre la retención de agua.

Los algoritmos de aprendizaje automático tuvieron un mayor rendimiento. Las MSV superaron a la regresión múltiple en suelos con alta variabilidad (Kaingo *et al*., 2018), aunque su sensibilidad a valores extremos afectó su rendimiento en PMP para los Luvisols ($R^2 = 0.20$). Los BA alcanzaron el mejor desempeño en Vertisols para CC

($R^2 = 0.94$), destacando su capacidad para modelar relaciones complejas (Rastgou *et al.*, 2020).

Finalmente, las RNA fueron el modelo con el mejor rendimiento en todos los suelos, con $R^2 > 0.80$ en Vertisols y Leptosols, y buen ajuste incluso en PMP (Haghverdi *et al.*, 2012; Pham *et al*., 2019). Estos resultados confirman que las RNA son una herramienta eficaz para predecir propiedades hidráulicas en suelos con condiciones físicas y químicas diversas.

CONCLUSIONES

Los Vertisols presentaron la mayor capacidad de agua disponible, atribuida a su alto contenido de arcillas 2:1 con elevada microporosidad, lo que incrementa la retención hídrica. No obstante, parte de esta agua queda fuertemente retenida a potenciales bajos, lo que limita su disponibilidad real para las plantas.

Las funciones de pedotransferencia basadas en redes neuronales artificiales muestran el mejor rendimiento predictivo frente a otros modelos evaluados.

BIBLIOGRAFÍA

Adhikari, K., & Hartemink, A.E. (2016). Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma,* 262:101–111. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009.

Bejar, P.S.J., Cantú, S.I., Yáñez, D.M.I. & Luna, R.E.O. (2020). Moisture retention curves and pedotransfer models in Andosol under different land uses. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(59). https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.666.

Beniaich, A., Otten, W., Shin, H.C., Cooper, H.V., Rickson, J., Soulaimani, A. & El Gharous, M. (2023). Evaluation of pedotransfer functions to estimate some of soil hydraulic characteristics in North Africa: A case study from Morocco. *Frontiers in Environmental Science*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1090688.

Çakir, R. & Cangir, C. (2021). Water retention and irrigation characteristics of Vertisols in northwestern Turkey. *Geoderma Regional*. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00402.

Cantú Silva, I., Sandoval García, C., González Rodríguez, H., Yánez Díaz, M.I., Marmolejo-Monsiváis, J.G. & Gómez-Meza, M.V. (2021). Effect of different land use in the physical and hydrological properties of a Luvisol in the state of Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales,* 12(68). https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.982

Castellanos Vargas, I., García Calderón, N. E. & Santana, Z. C. (2017). Procesos físicos del suelo en la reserva ecológica del Pedregal de San Ángel de Ciudad Universitaria: atributos para su conservación. *Terra Latinoamericana,* 35: 51–64.

Cousin, I., Buis, S., Lagacherie, P., Doussan, C., Le Bas, C. & Guérif, M. (2022). Available water capacity from a multidisciplinary and multiscale viewpoint. A review. *Agronomy for Sustainable Development,* 42(46). https://doi.org/10.1007/s13593-022-00774-8/Published.

Faouzi, E., Arioua, A., Namous, M., Barakat, A., Mosaid, H., Ismaili, M., Eloudi, H. & Hanadé, H.I. (2023). Spatial mapping of hydrologic soil groups using machine learning in the Mediterranean region. *Catena,* 232: 107–364. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107364.

Haghverdi, A., Cornelis, W.M. & Ghahraman, B. (2012). A pseudo-continuous neural network approach for developing water retention pedotransfer functions with limited data. *Journal of Hydrology,* 442–443: 46–54. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.03.036.

Hatfield, J.L. & Dold, C. (2019). Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. *Frontiers in Plant Science,* 10:103. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00103.

Hernández, V., Olarte, M.C., Ruge, J.C., Gabriel Bastidas, J., Herrera, C. E. & Fernando Otálvaro, I. (2022). Evaluation of water retention curves in soils with different fines content. *Arabian Journal of Geosciences.* https://doi.org/10.1007/s12517-022-10189-0.

INEGI. (2009). Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie IV (continuo nacional). http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/usv250ks4gw.html.

Kaingo, J., Tumbo, S.D., Kihupi, N.I., & Mbilinyi, B.P. (2018). Prediction of Soil Moisture-Holding Capacity with Support Vector Machines in Dry Subhumid Tropics. *Applied and Environmental Soil Science.* https://doi.org/10.1155/2018/9263296.

Kukal, M.S., Irmak, S., Dobos, R. & Gupta, S. (2023). Atmospheric dryness impacts on crop yields are buffered in soils with higher available water capacity. *Geoderma,* 429: 116270. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116270.

Lince-Salazar, L.A. (2021). Capacidad de almacenamiento de agua en suelos cultivados en café y otras propiedades edáficas relacionadas. *Revista Cenicafé,* 72(1): e72101. https://doi.org/10.38141/10778/72101.

Mbayaki, C.W. & Karuku, G.N. (2022). Soil hydraulic properties of a Chromic Luvisol in Katumani, Kenya. *Tropical and Subtropical Agroecosystems,* 25(3), 094. https://doi.org/10.56369/TSAES.4200.

McBratney, A., Minasny, B. & Stockmann, U. (2018). Pedotransfer Functions and Soil Inference Systems. In Pedometrics (pp. 195–220). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63444-7_7.

Moratelli, F. A., Alves, M.A.B., Borella, D.R., Kraeski, A., Almeida, F.T. de, Zolin, C.A., Hoshide, A.K. & Souza, A.P. de. (2023). Effects of Land Use on Soil Physical-Hydric Attributes in Two Watersheds in the Southern Amazon, Brazil. Soil Systems. https://doi.org/10.3390/soilsystems7040103.

Pham, K., Kim, D., Yoon, Y. & Choi, H. (2019). Analysis of neural network based pedotransfer function for predicting soil water characteristic curve. *Geoderma,* 351: 92–102. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.013.

Rastgou, M., Bayat, H., Mansoorizadeh, M. & Gregory, A.S. (2020). Estimating the soil water retention curve: Comparison of multiple nonlinear regression approach and random forest data mining technique. *Computers and Electronics in Agriculture,* 174:105502. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105502.

Román-Dobarco, M., Cousin, I., Le Bas, C. & Martin, M.P. (2019). Pedotransfer functions for predicting available water capacity in French soils, their applicability domain and associated uncertainty. *Geoderma,* 336:81–95. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.022.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana que establece las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreos y Análisis (NOM-021-RECNAT-2000). Diario Oficial de la Federación 31 de diciembre 2002. México, DF. 85 p.

Wang, Y., Shao, M. & Liu, Z. (2012). Pedotransfer functions for predicting soil hydraulic properties of the Chinese loess plateau. *Soil Science*, 177:424–432. https://doi.org/10.1097/SS.0b013e318255a449.

Zhang, X., Zuo, Y., Wang, T. & Han, Q. (2024). Salinity Effects on Soil Structure and Hydraulic Properties: Implications for Pedotransfer Functions in Coastal Areas. *Land,* 13:2077. https://doi.org/10.3390/land13122077.

HACIA UN SISTEMA DE INFERENCIA ESPACIAL DE SUELOS: RESCATE, ARMONIZACIÓN Y MODELACIÓN DIGITAL DEL CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO

Carlos E. Arroyo Cruz[1]; Mario Guevara[1]

[1] Instituto de Geociencias - Universidad Nacional Autónoma de México - Campus Juriquilla, Querétaro. México.

Correo del autor de correspondencia: carlos.arroyo@geociencias.unam.mx

RESUMEN

La disponibilidad, calidad y accesibilidad de datos edáficos condicionan la investigación y la toma de decisiones en el manejo del territorio. El objetivo de este estudio fue retomar, armonizar y poner a disposición un conjunto de datos nacionales de suelos agrícolas, así como evaluar esquemas de modelación digital del carbono orgánico del suelo (COS) a escala nacional y por ecorregiones en México, con el fin de mejorar la representación espacial del recurso edáfico. Se integraron y armonizaron tres fuentes nacionales de datos de suelos (la Base de Perfiles de Suelos en México, la Serie III de INEGI y el levantamiento agrícola 2012 de SAGARPA–FAO). Se evaluaron esquemas de modelación digital de suelos (MDS) del COS (0–30 cm) a escala nacional y por ecorregiones. En conjunto, las tres fuentes suman 23,269 registros, con densidades de muestreo similares entre ecorregiones, aunque con subrepresentación en Selvas Cálido-Húmedas y California Mediterránea. Se compilaron 141 predictores (topografía, clima, material parental, variables multiespectrales, entre otros) armonizados a 30 m usando el Continuo de Elevación Mexicano. El espacio fue segmentado por ecorregiones terrestres y se compararon algoritmos (RF, KKNN, SVM, Cubist). La selección de variables con el método Boruta mostró que los predictores dominantes difieren entre regiones; mientras que, a escala nacional, RF con variables estadísticas significativas alcanzó mejor desempeño ($r \approx 0.86$; $R^2 \approx 0.74$) que el modelo con todas las variables. Estos resultados apoyan los procesos de selección de covariables y subrayan el valor de rescatar y publicar datos edáficos históricos para fortalecer la MDS en México.

PALABRAS CLAVE: *sistema de inferencia; mapeo digital de suelos; selección de variables; ecorregiones; armonización.*

INTRODUCCIÓN

El Mapeo Digital de Suelos (MDS) se fundamenta en relaciones cuantitativas entre observaciones edáficas georreferenciadas y factores formadores del suelo (ClORPT; ampliado por SCORPAN), para inferir propiedades en sitios no muestreados (Lagacherie y McBratney, 2007; McBratney *et al*., 2003; Jenny, 1941). En México, la elevada heterogeneidad ambiental y la diversidad de paisajes demandan mayor densidad y cobertura de datos, así como procesos para retomar, armonizar y dar acceso abierto a colecciones históricas, incluyendo levantamientos agrícolas (SAGARPA, 2012). El COS

varía por gradientes climáticos, topográficos y ecológicos; la estratificación por ecorregiones terrestres puede mejorar la interpretación y el desempeño predictivo al capturar diferencias estructurales en los controles ambientales (Zhang *et al*., 2024; Morrone, 2019; INEGI-CONABIO, 2008). Por lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron: (i) retomar y documentar un acervo de datos clave, (ii) armonizar fuentes nacionales en una base común y (iii) evaluar esquemas MDS del COS a escala nacional y por ecorregiones, para cuantificar el aporte de la selección optimizada de predictores con el método Boruta, comparando algoritmos de aprendizaje automático.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fuentes de datos. Se integraron tres bases de datos que en conjunto suman 23,269 registros de materia orgánica (MO) y densidad aparente (DA) en México. Los procedimientos de laboratorio para la estimación de estas características están descritos en la Norma Oficial Mexicana NOM 021 (SEMARNAT, 2002). El contenido de carbono orgánico fue estimado a partir de la MO (método de combustión húmeda Walkley y Black, 1934), multiplicado por el factor de conversión 0.58 (Sparks, 1996). Las estimaciones de densidad de COS se determinaron siguiendo la ecuación 1 descrita en (Paz-Pellat y Velázquez-Rodríguez, 2018).

$$COS = (DensAp)(p)(COSp)\left(1 - \frac{Frag}{100}\right) \dots\dots\dots\dots\dots 1$$

donde DensAp es la densidad aparente (DA) (t m^{-3}), p es la profundidad del suelo (cm), COSp es la concentración de carbono (%) en la profundidad p y Frag es el porcentaje de fragmentos gruesos (para esta estimación se consideró como 0). Para los sitios donde no se cuenta con mediciones de DensAp, se estimó mediante la ecuación de Rawls *et al*. (2024).

Los valores muestran amplia variabilidad entre unidades de uso de suelo y vegetación (INEGI, 2021). En sistemas agrícolas, las medianas se ubican entre 40 y 70 t ha^{-1}, con máximos de hasta 19,600 t ha^{-1} en agricultura de humedad anual. Los pastizales presentan medianas de 29 a 38 t ha^{-1}, mayores en los cultivados e inducidos que en los naturales. Los matorrales registran entre 8 y 35 t ha^{-1}, aunque los submontanos y subtropicales alcanzan valores más altos. Los bosques concentran las mayores reservas: oyamel y mesófilo superan 70 t ha^{-1} de mediana y 700 t ha^{-1} de máximo, mientras que encinares y pinares varían entre 38–61 t ha^{-1} con máximos > 500 t ha^{-1}. En selvas, los contenidos son intermedios a altos (52–114 t ha^{-1}), destacando las selvas altas perennifolias y bajas subcaducifolias. Los humedales constituyen los principales reservorios: los popales promedian 810 t ha^{-1} con máximos de 2,340 t ha^{-1}, seguidos por tulares y manglares (42–72 t ha^{-1}).

La variable objetivo fue el almacén de COS (t ha^{-1}, 0–30 cm), estimado por medias ponderadas siguiendo el procedimiento descrito en (Paz-Pellat y Velázquez-Rodríguez, 2018). Conformamos la matriz de regresión (MReg) extrayendo 141 predictores (topográficos, grupos de suelo, climáticos, material parental, espectrales y vegetación y

geográficos), siguiendo los criterios de representación de factores de formación del suelo establecidos en la ecuación conceptual para la modelación conocida como SCORPAN (McBratney *et al*., 2003).

Una vez determinada la MReg, se segmentaron los datos por ecorregiones terrestres (INEGI-CONABIO, 2008). Para cada ecorregión, dividimos aleatoriamente en entrenamiento (75%) y prueba (25%); los conjuntos de prueba por ecorregión se utilizaron para validar el modelo nacional. La predicción del mejor modelo se ponderó con base en la profundidad efectiva del suelo (Arroyo-Cruz *et al*., 2025, manuscrito en preparación).

Selección de variables. El método Boruta (Kursa y Rudnicki, 2010) es un enfoque estadístico diseñado para la selección de variables más relevantes. Boruta clasifica las variables en predictores confirmados, tentativos y rechazados mediante comparación con variables sintéticas o permutadas conocidas como shadow features, este proceso se realiza de forma iterativa hasta que todas las variables hayan sido clasificadas. Evaluamos además una variante, que incluye variables tentativas en la selección de importancia. En Boruta, no se fijan de manera absoluta criterios de rechazo de variables, sino que se determinan de forma iterativa mediante la comparación de la importancia de cada predictor con los shadow features. Su objetivo es identificar de manera exhaustiva todas las variables o predictores más relevantes para un modelo predictivo, asegurando que ninguna variable potencialmente útil sea pasada por alto. Este método se fundamenta en el cálculo de la importancia de las variables a través de la creación de árboles de regresión con base en la teoría de Random Forest (RF).

Algoritmos y validación. Se probaron RF (Brieman, 2001), KKNN (Hechenbichler, 2004), SVM (Cortes y Vapnik, 1995), Cubist (Quinlan, 1992). Para cada algoritmo, ajustamos tres configuraciones de covariables mediante el uso del método Boruta: AllData (todos los 141 predictores), Boruta (variables confirmadas como mejores predictores) y BorutaFix (predictores confirmados importantes + predictores posibles o tentativos). La validación del desempeño de cada configuración de covariables incluyó prueba independiente (25%) y validación cruzada 10-fold; reportamos RMSE, R y R^2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La base de datos compilada exhibe coberturas comparables entre ecorregiones (~1 muestra cada 10 km^2), con baja densidad en Selvas Cálido-Húmedas y California Mediterránea. El rescate y publicación del levantamiento agrícola 2012 aporta información de las características físicas y químicas básicas de los suelos (pH, CE, MO, textura, nutrientes, CIC, RAS, PSI) y evidencia la importancia de prácticas de archivo y espejeo para evitar pérdidas de acceso público.

Boruta reveló contrastes regionales en los controles del COS. Entre las cinco variables más importantes por región destacan combinaciones de topografía (pendiente), parámetros bioclimáticos (Bio02, Bio05, Bio08, Bio14, Bio15, Bio18, Bio19), coordenadas oblicuas (pi0.17–0.83) e índices espectrales (WDRVI: Índice de vegetación de amplio rango dinámico, DVI: Relación simple NIR/RED Diferencia Índice de vegetación, Número de índice de vegetación, LogR: Relación logarítmica), con patrones que cambian entre California Mediterránea, Desiertos de América del Norte, Elevaciones Semiáridas

Meridionales, Grandes Planicies, Selvas Cálido-Húmedas, Selvas Cálido-Secas y Sierras Templadas. Esto confirma que la heterogeneidad ambiental modula los factores explicativos del COS y justifica la estratificación por ecorregiones.

En RF (Figura 1) con validación independiente, el modelo nacional alcanzó r ≈ 0.86 (R^2 ≈ 0.74) usando Boruta (frente a r ≈ 0.80; R^2 ≈ 0.63 con AllData), mientras BorutaFix mostró desempeño intermedio (r ≈ 0.84; R^2 ≈ 0.70). A escala de ecorregiones, BorutaFix no mejora sistemáticamente el desempeño; sus beneficios se observan en Sierras Cálido-Húmedas y California Mediterránea, y efectos neutros/negativos en otras regiones, resaltando que más variables no implican mejor generalización. Estos resultados superan los obtenidos en la literatura (Guevara *et al*., 2018; 2020) y, son coherentes con el principio de que los modelos que aplican metodologías de selección de predictores suelen rendir mejor que los modelos sin depuración de covariables.

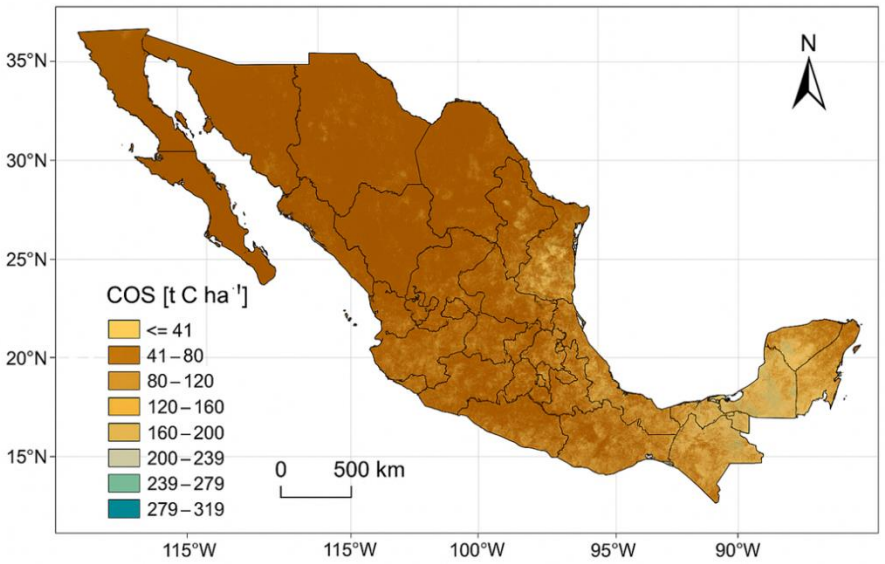


Figura 1. Distribución espacial del carbono orgánico del suelo en México de acuerdo con el algoritmo Random Forest: cada píxel fue ajustado con la profundidad efectiva estimada por medio de una ponderación lineal.

CONCLUSIONES

Las fuentes nacionales de datos (tres) se agruparon en una base armonizada para COS (0–30 cm), con 23,269 registros y 141 predictores estandarizados a 30 m. 2) La estratificación por ecorregiones mejora la interpretación y, en combinación con Boruta, eleva el desempeño de los modelos respecto a usar todos los predictores. 3) A nivel nacional, RF-Boruta presentó el mejor balance entre error y explicación de varianza. 4) El rescate y la publicación de levantamientos históricos (como el agrícola 2012) son esenciales para sostener el MDS, reducir costos de campo y garantizar reproducibilidad.

Recomendamos institucionalizar prácticas de archivo, metadatos y espejeo que aseguren la accesibilidad permanente de los datos edáficos.

AGRADECIMIENTOS

Financiamiento Conahcyt (Grant/Award Number: grant no. CF-2023-I-1846), UNAM PAPIIT (Grant/Award Number: "IV200223"), UNESCO-IGCP (Grant/Award Number: "grant no. 765").

BIBLIOGRAFÍA

Arroyo-Cruz, C.E., Prado, B., Kolb, M., Mora-Palomino, L.N., Todd-Brown, K. & Guevara, M. (2025). Synthesis of a national soil dataset across productive land in Mexico: The importance of making existing data accessible. *European Journal of Soil Science,* 76, e70116. https://doi.org/10.1111/ejss.70116.

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45, 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

Cortes, C. & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning,* 20, 273–297. https://doi.org/10.1007/BF00994018.

Guevara, M., Arroyo, C., Brunsell, N., Cruz, C. O., Domke, G., Equihua, J., Etchevers, J., Hayes, D., Hengl, T., Ibelles, A., Johnson, K., De Jong, B., Libohova, Z., Llamas, R., Nave, L., Ornelas, J.L., Paz, F., Ressl, R., Schwartz, A., … Vargas, R. (2020). Soil organic carbon across Mexico and the conterminous United States (1991–2010). *Global Biogeochemical Cycles,* 34(3), e2019GB006219. https://doi.org/10.1029/2019GB006219.

Guevara, M., Olmedo, G.F., Stell, E., Yigini, Y., Aguilar Duarte, Y., Arellano Hernández, C., Arévalo, G.E., Arroyo-Cruz, C.E., Bolivar, A., Bunning, S., Bustamante Cañas, N., Cruz-Gaistardo, C.O., Davila, F., Dell Acqua, M., Encina, A., Figueredo Tacona, H., Fontes, F., Hernández Herrera, J.A., Ibelles Navarro, A.R., … Vargas, R. (2018). No silver bullet for digital soil mapping: Country-specific soil organic carbon estimates across Latin America. *SOIL,* 4(3), 173–193. https://doi.org/10.5194/soil-4-173-2018.

Hechenbichler, K. & Schliep, K. P. (2004). Weighted k-nearest-neighbor techniques and ordinal classification (Discussion Paper 399). SFB 386, Ludwig-Maximilians University Munich.

INEGI. (2021). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación. Escala 1:250 000, Serie VII. Conjunto Nacional. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

INEGI-Instituto Nacional de Geografía y Estadística. (2013). Continuo de elevación mexicano (CEM) ver. 3. http://www.inegi.org.mx/.

INEGI–CONABIO. (2008). Ecorregiones terrestres de México. México: INEGI, CONABIO e INE.

Kursa, M.B. & Rudnicki, W. R. (2010). Feature selection with the Boruta package. *Journal of Statistical Software,* 36(11), 1–13. https://doi.org/10.18637/jss.v036.i11.

Lagacherie, P. & McBratney, A.B. (2007). Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: Perspectives for digital soil mapping. In P. Lagacherie, A. B. McBratney, & M. Voltz (Eds.), Digital soil mapping: An introductory perspective (pp. 3–24). Elsevier.

McBratney, A.B., Mendonça-Santos, M.L. & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma,* 117, 3–52. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4.

Morrone, J.J. (2019). Regionalización biogeográfica y evolución biótica de México: Encrucijada de la biodiversidad del Nuevo Mundo. *Revista Mexicana de Biodiversidad,* 90, e902980. https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2019.90.2980.

Paz-Pellat, F. & Velázquez-Rodríguez, A.S. (2018). Base de datos de perfiles de suelos en México. *Elementos para Políticas Públicas,* 2(3), 210–235.

Quinlan, R. (1992). Learning with continuous classes. In Proceedings of the 5th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence (pp. 343–348).

Rawls, W.A., Nemes, A. & Pachepsky, Y.A. (2004). Effect of soil organic carbon on soil hydraulic properties. Developments in Soil Science, 30, 95–114.

Rego, F.C., Cadima, I.S.P. & Strand, E.K. (2020). A log-ratio vegetation index (LRVI) for discrimination and classification of remote sensing data. Silva Lusitana, 28(1), 45–70. https://doi.org/10.1051/silu/20202801045.

SAGARPA. (2012). Subíndice de uso sustentable del suelo: Metodología de cálculo. México: FAO-SAGARPA.

Schuenemeyer, J.H. & Drew, L.J. (2011). Statistics for earth and environmental scientists. John Wiley & Sons.

SEMARNAT. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM 021-SEMARNAT-2000: Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf

Sparks, D.L. (Ed.). (1996). Methods of soil analysis. Part 3: Chemical methods (SSSA Book Series No. 5). Soil Science Society of America.

Zhang, Q., Yue, C., Yu, P., Xu, H., Wu, J. & Sheng, F. (2024). Soil organic carbon storage and stratification in land use types in the source area of the Tarim River Basin. Sustainability, 16(24), 11255. https://doi.org/10.3390/su162411255.

CLASIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE COMPONENTES DEL SUELO EN SECCIÓN DELGADA: FUNCIONES DISCRIMINANTES BASADAS EN VALORES DE BRILLO

Juan Carlos Sandoval Aparicio[1]; Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena[1]; Tania González Vargas[2]; Gustavo Andrés Ramírez Gómez[1]; Julián Delgadillo Martínez[1]; Gerardo Cruz Flores[3]; Carlos Alberto Ortiz Solorio[1]

[1] Colegio de Postgraduados, km 36.5 Carr. México-Texcoco, Col. Montecillo, CP. 56264. Texcoco, Estado de México. México.
[2] Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias Campus Juriquilla. Boulevard Juriquilla 3001. CP. 76230. Juriquilla, Querétaro, México.
[3] Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. Batalla 5 de Mayo s/n esquina Fuerte de Loreto, Colonia Ejército de Oriente, CP. 09230. Iztapalapa, Ciudad de México, México.

Correo del autor de correspondencia: sandoval.juan@colpos.mx

RESUMEN

El análisis micromorfológico de secciones delgadas del suelo es fundamental para estudiar la organización y la dinámica de los componentes edáficos, aunque tradicionalmente ha sido de carácter cualitativo y dependiente del observador. En este estudio se generaron funciones discriminantes basadas en los valores de brillo para clasificar agregados, minerales, carbonatos, porosidad y colonias bacterianas en mosaicos digitales de alta resolución. A partir de este paso, se generaron mapas temáticos y cuantificaron los componentes del suelo. Se trabajó con secciones delgadas de Andosoles y Solonchaks, definiendo campos de entrenamiento con valores espectrales RGB. Los modelos generados alcanzaron precisiones superiores al 90%, con la mayor exactitud en carbonatos (99.8%) y la menor en porosidad (93.7%). Los resultados muestran diferencias en la respuesta espectral de cada componente, lo que permitió generar mapas temáticos que representan su distribución espacial y cobertura relativa. En conjunto, los resultados muestran la robustes del análisis discriminante lineal como una herramienta cuantitativa al realizar estudios micromorfológicos del suelo; además, abren posibilidades para automatizar la caracterización de secciones delgadas con alta precisión.

PALABRAS CLAVE: *Análisis discriminante lineal, micromorfología de suelos, micromorfometría.*

INTRODUCCIÓN

El análisis de secciones delgadas del suelo es una herramienta clave para comprender la organización y la dinámica de los componentes edáficos a escalas microscópicas. Esta técnica permite observar directamente la distribución espacial, morfológica y las relaciones entre las fracciones sólidas y los poros del suelo, proporcionando información valiosa para estudios micromorfológicos y pedogenéticos. Comúnmente el análisis de secciones delgadas ha sido cualitativo y dependiente del criterio del observador (Bullock

et al., 1985; Brewer, 1976), lo que propició el desarrollo de metodologías cuantitativas basadas en imágenes digitales.

En años recientes, se desarrollaron enfoques computacionales para automatizar la segmentación y clasificación de componentes del suelo en imágenes de secciones delgadas, utilizando procesamiento digital de mosaicos y aprendizaje automático (Gutiérrez-Castorena *et al*., 2018; Terribile y Fitzpatrick, 1995). Estos avances permitieron la cuantificación y el mapeo de componentes minerales, materia orgánica, poros y agregados, a partir de características espectrales derivadas de imágenes RGB. Particularmente, el análisis de valores de brillo en cada canal de color demostró ser útil para clasificar materiales con diferentes propiedades ópticas, relacionadas con su composición física y química (Zickel *et al*., 2024).

En este contexto, el uso de funciones discriminantes lineales (LDA, por sus siglas en inglés) demostró ser una herramienta estadística robusta para clasificar los componentes del suelo en función de variables espectrales (González-Vargas y Gutiérrez-Castorena, 2022). Por ello, el objetivo de este estudio fue desarrollar y evaluar las funciones discriminantes lineales y generar modelos para clasificar los componentes del suelo (minerales, poros, la fase sólida del suelo y colonias bacterianas), así como cuantificar y generar mapas temáticos en mosaicos de alta resolución de secciones delgadas de suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron 12 secciones delgadas correspondientes al horizonte superficial (0–10 cm) de dos grupos de suelos del Estado de México: seis de Andosoles y seis de Solonchaks. Las secciones se prepararon siguiendo el procedimiento descrito por Murphy (1986), y la descripción de los componentes del suelo se realizó conforme a los criterios de Bullock *et al*. (1985) y Stoops (2003). En cada sección delgada se capturaron imágenes digitales secuenciales que cubrían una superficie de 1 cm², con un aumento de 4X y cuatro fuentes de iluminación: luz polarizada plana (PPL), luz polarizada cruzada (XPL), luz polarizada cruzada con compensador de yeso (XPLλ) y luz ultravioleta (UV). El procesamiento de estas imágenes para construir mosaicos de alta resolución se realizó según el procedimiento descrito por Gutiérrez-Castorena *et al*. (2018) y Gutiérrez-Castorena *et al*. (2016).

Del total de imágenes individuales obtenidas, se seleccionaron cuatro por cada grupo de suelo (Andosols y Solonchaks), en función de su representatividad y calidad. En cada imagen se definieron cuatro campos de entrenamiento (agregados, minerales, porosidad y bacterias), con 100 puntos cada uno, generando un total de 3,600 puntos de entrenamiento. En cada punto de entrenamiento se extrajeron los valores de brillo en las bandas RGB, obteniéndose un total de 12 bandas. Finalmente, el análisis discriminante lineal para obtener los modelos de clasificación de los componentes, su cuantificación y la elaboración de los mapas temáticos se realizó siguiendo el procedimiento propuesto por González-Vargas y Gutiérrez-Castorena (2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis discriminante lineal mostró diferencias en la respuesta de cada clase en función de la fuente de iluminación y la banda espectral (Cuadro 1). Por ejemplo, los agregados del suelo se distinguen mejor con la banda roja en PPL y XPL. En el caso de los minerales, la discriminación fue más consistente con XPL y XPLλ. Los carbonatos mostraron una señal particularmente nítida en la banda roja con XPL y las colonias bacterianas se identificaron fácilmente en la banda azul con luz UV. Estos resultados coinciden con lo reportado para otros componentes del suelo, donde la característica de interés se refleja mejor en ciertas bandas debido a su birrefringencia (Adderley *et al*., 2002).

La evaluación de los modelos de clasificación mostró que la precisión general fue superior al 90% para todas las clases. La porosidad presentó el menor porcentaje (93.7%), mientras que los carbonatos lograron la mayor exactitud (99.8%). Estas diferencias reflejan la variabilidad en la respuesta espectral de cada componente del suelo, pero, en conjunto, confirman la solidez del análisis discriminante lineal como método para caracterizar y clasificar dichos componentes, y son comparables con los resultados obtenidos mediante otros métodos de clasificación supervisada para la cartografía temática en secciones delgadas de suelo (González-Vargas y Gutiérrez-Castorena, 2022; Gutiérrez-Castorena *et al*., 2018).

Cuadro 1. Bandas espectrales y fuentes de luz utilizadas para generar los modelos LDA y su precisión en la clasificación de componentes edáficos de secciones delgadas.

Clase	FL†	B	Función discriminante	C	PG
Agregados	PPL XPL	R R	(0.0295203*R) + (-0.0106537*R) -4.59718	1.8300	97.30
Porosidad	PPL	R	(0.0263214*R) - 4.60619	0.0320	93.68
Minerales	XPL XPLλ	R	(0.0434639*R) - 5.93012	-0.0240	99.13
Carbonatos	XPL	R	(0.0657755*R) - 6.06680	3.3600	99.80
Colonias bacterianas	UV	B	(0.0471947*B) - 9.62125	0.1173	98.09

†FL = fuente de luz; B = banda; C = centroide; PG = precisión general; PPL = luz polarizada plana; XPL = luz polarizada; XPLλ = luz polarizada con compensador; UV = luz ultravioleta; R= banda roja (red).

La aplicación de las funciones discriminantes a los mosaicos de alta resolución permitió separar cada componente del suelo en capas individuales, que posteriormente se integraron en un mapa temático que muestra su distribución espacial dentro del mosaico (Figura 1). La cuantificación se obtuvo a partir de la proporción de píxeles que representaba cada clase respecto al total de la imagen, lo que permitió estimar su

cobertura relativa. Este procedimiento facilitó la visualización y comparación de la abundancia relativa de los componentes en la muestra analizada.

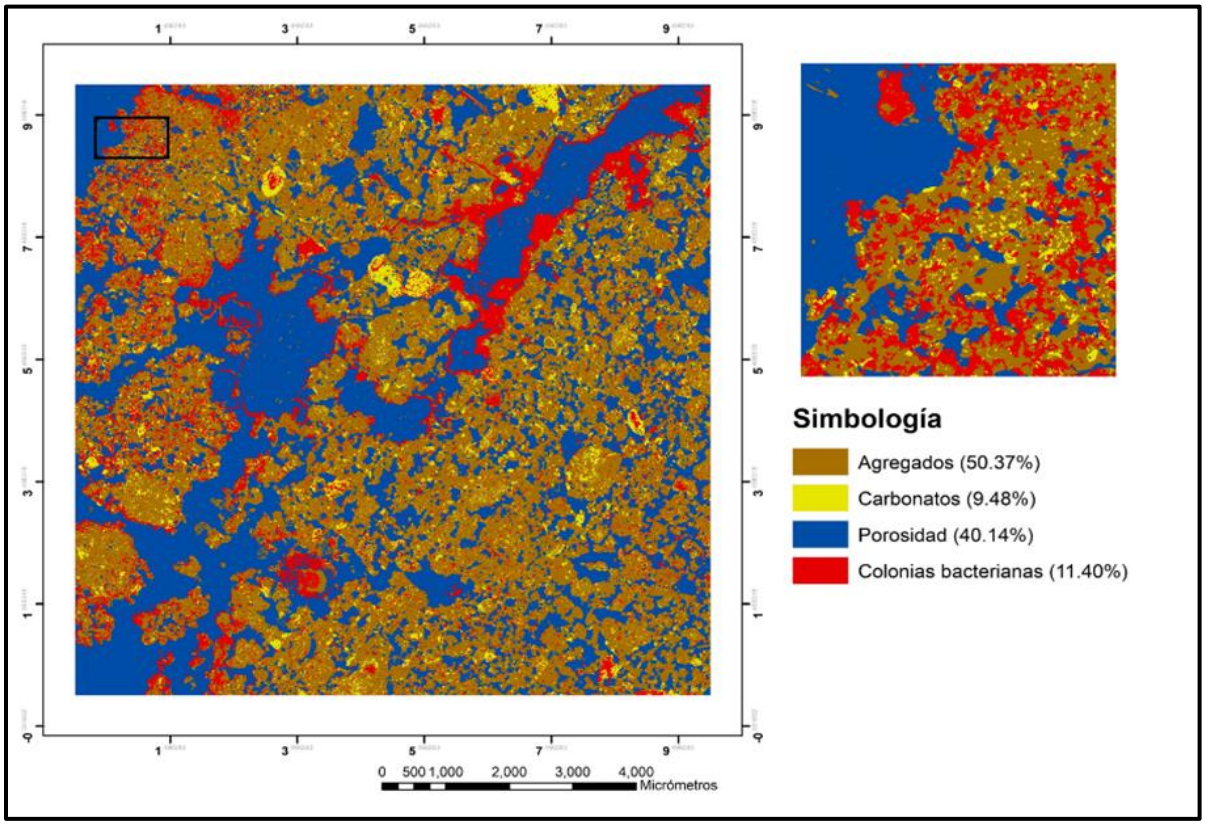


Figura 1. Mapa temático de la distribución espacial de agregados, minerales, carbonatos, porosidad y colonias bacterianas obtenidos mediante LDA en mosaicos digitales de alta resolución.

CONCLUSIONES

El análisis discriminante lineal demuestra ser un método confiable para distinguir y clasificar los componentes del suelo en secciones delgadas, utilizando diferentes bandas espectrales y fuentes de iluminación. La precisión de la clasificación es alta, con valores superiores al 90%, lo que permite generar mapas temáticos de alta resolución para analizar la distribución espacial y cuantificar la cobertura relativa de agregados, minerales, carbonatos, porosidad y colonias bacterianas.

BIBLIOGRAFÍA

Adderley, W.P., Simpson, I.A. & Davidson, D.A. (2002). Colour description and quantification in mosaic images of soil thin sections. *Geoderma*, 108(3-4), 181-195. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00123-4.

González-Vargas, T. & Gutiérrez-Castorena, M.C. (2022). Brightness values-based discriminant functions for classification of degrees of organic matter decomposition in soil thin sections. *Spanish Journal of Soil Science,* 12, 10348. https://doi.org/10.3389/sjss.2022.10348.

Gutiérrez-Castorena, E.V., Gutiérrez-Castorena, M.C., González-Vargas, T., Cajuste-Bontemps, L., Delgadillo-Martínez, J., Suástegui-Méndez, E. & Ortiz-Solorio, C.A. (2016). Micromapping of microbial hotspots and biofilms

from different crops using digital image mosaics of soil thin sections. *Geoderma*, 279, 11–21. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.05.017.

Gutiérrez-Castorena, M.C., Gutiérrez-Castorena, E.V., González-Vargas, T., Ortiz-Solorio, C.A., Suástegui-Méndez, E., Cajuste-Bontemps, L. & Rodríguez-Mendoza, M.N. (2018). Thematic micro-maps of soil components using high-resolution spatially referenced mosaics from whole soil thin sections and image analysis. *European Journal of Soil Science,* 69(2), 217-231. https://doi.org/10.1111/ejss.12506.

Terribile, F. & Fitzpatrick, E.A. (1995). The application of some image-analysis techniques to recognition of soil micromorphological features. *European journal of soil science,* 46(1), 29-45. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1995.tb01810.x.

Zickel, M., Gröbner, M., Röpke, A. & Kehl, M. (2024). MiGIS: micromorphological soil and sediment thin section analysis using an open-source GIS and machine learning approach. *E&G Quaternary Science Journal*, 73(1), 69-93. https://doi.org/10.5194/egqsj-73-69-2024, 2024.

PEDOLOGÍA DE LAS TERRAZAS AGRÍCOLAS POPOLOCAS DE PUEBLA

Javier Leonardo Toxqui Roldán[1]; Carlos Alberto Ortiz Solorio[1]; Ma del Carmen Gutiérrez Castorena[1]

[1] Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, CP. 56264. Texcoco de Mora, Edo. de México, México.

Correo del autor de correspondencia: toxqui.javier@colpos.mx

RESUMEN

En este estudio se analizaron las propiedades morfológicas y la clasificación de los suelos formados en terrazas agrícolas de escorrentía de la comunidad popoloca de Santiago Acatepec (Puebla), así como la caracterización de sus sistemas constructivos. Se describieron y clasificaron nueve perfiles de suelo en tres sistemas de terrazas: dos de ellos tienen más de 100 años de antigüedad y el tercero menos de 50. Según la WRB, todos los perfiles corresponden a Terric Anthrosols, mientras que la Taxonomía de Suelos los clasifica como Haplustolls. Los materiales parentales provienen de sedimentos aluviales y coluviales de basalto, roca caliza y materia orgánica de Leptosols y Regosols ubicados aguas arriba. Los suelos superaron los dos metros de espesor, presentaron un color gris muy oscuro o negro, una estructura biogénica migajosa o granular y horizontes mólicos o térricos. Se observaron revestimientos de arcilla, artefactos en baja proporción y concreciones de carbonato de calcio que no formaban horizontes cálcicos. El análisis espacial determinó que las terrazas agrícolas cubren 2,578 hectáreas (el 25 % del territorio comunitario) y se presenta diversidad de muros y bordos. Estos resultados evidencian que las terrazas agrícolas constituyen una tecnología capaz de generar suelos de alta calidad y de sostener la producción agrícola en ambientes semiáridos.

PALABRAS CLAVE: A*nthosols; antropedogénesis; tecnología agrícola; conocimiento ancestral; conservación de suelo.*

INTRODUCCIÓN

Una terraza agrícola se define como una superficie artificialmente nivelada destinada al cultivo, cuyos elementos de retención favorecen la acumulación de materiales minerales y orgánicos, eliminando la pendiente original del terreno (Spencer y Hale, 1961). En el continente americano, el uso de terrazas como tecnología agrícola se remonta aproximadamente a entre 3000 y 2500 años AP (Sandor, 2006). Los primeros agricultores invirtieron grandes esfuerzos en su construcción para facilitar las labores agrícolas y aumentar la disponibilidad de humedad en el suelo (Doolittle, 1990).

De acuerdo con su ubicación en el paisaje, las terrazas agrícolas pueden clasificarse en terrazas de ladera y terrazas de escorrentía (Wei *et al*., 2016). El uso y mantenimiento de estas estructuras resultan esenciales para la conservación del suelo y el agua, especialmente en el contexto de la agroecología y la agricultura regenerativa.

En este trabajo se describen, desde un enfoque morfológico, los suelos formados en las terrazas agrícolas y se caracterizan los sistemas de terrazas presentes en la comunidad de Santiago Acatepec, Puebla.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en los Bienes Comunales de Santiago Acatepec, en el municipio de Caltepec (Puebla), que tienen una superficie de 10,366 ha. El clima es BSk, semiárido templado-frío, con una precipitación media anual de 557 mm. (SMN, 2011). La litología, según el SGM (1982) incluye lutita-caliza, arenisca-toba andesítica, toba andesítica-arenisca, rocas metasedimentarias y depósitos aluviales.

Se describieron y clasificaron nueve perfiles de suelo de terrazas agrícolas de escorrentía dispuestos en tres catenas. Los sistemas se designaron como A, B y C. La clasificación científica de los perfiles se realizó mediante descripción morfológica, análisis de laboratorio e identificación taxonómica, conforme a la WRB (IUSS Working Group WRB, 2022) y la Claves para la Taxonomía de Suelos (SSS, 2022).

La caracterización de las terrazas agrícolas se llevó a cabo mediante entrevistas abiertas a informantes clave, recorridos de campo y análisis espacial para delimitar el área terraceada, para lo cual se emplearon imágenes satelitales y modelos digitales de elevación en un sistema de información geográfica.

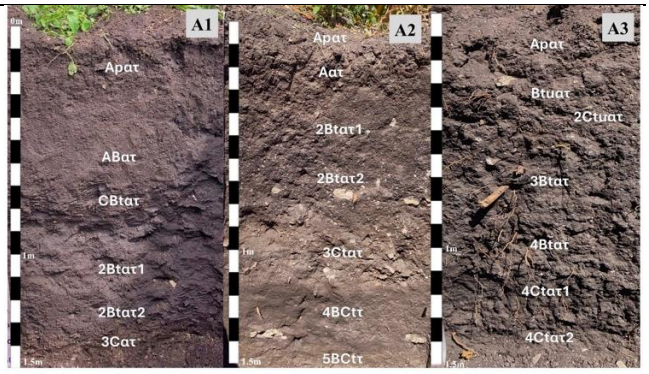
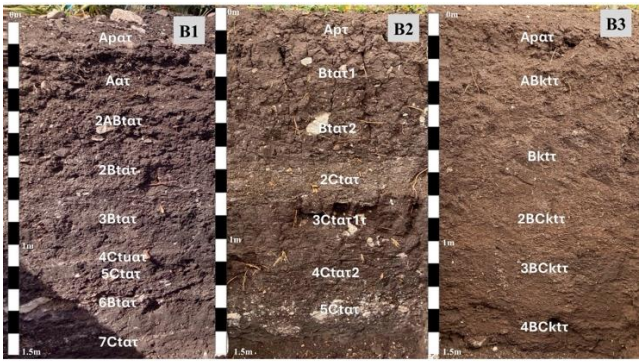
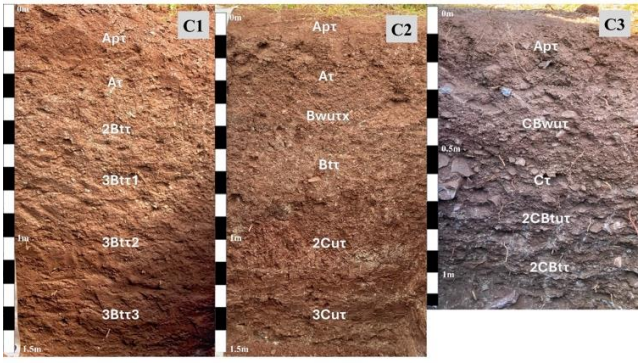
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos en los sistemas de terrazas se clasificaron como Terric Anthrosols (WRB); mientras que, a nivel de Gran grupo de las Claves para la Taxonomía de Suelos se identificaron como Haplustolls (Cuadro 1). Esta clasificación coincide con la reportada por Itkin *et al*. (2022) y Sandor *et al*. (2021) para terrazas agrícolas en España y Perú.

De acuerdo con los informantes locales, las terrazas de los sistemas A y B superan los cien años de antigüedad, mientras que las del sistema C tienen menos de cincuenta años. Los suelos se formaron a partir de sedimentos aluviales y coluviales derivados de basalto, roca caliza y materia orgánica procedente de Leptosols y Regosols ubicados aguas arriba, lo que es característico de los suelos de terrazas en climas semiáridos (Sandor y Homburg, 2017). Todos superan los 2 m de espesor si se considera la base del muro de contención como límite inferior del perfil. Predomina el color gris muy oscuro (10YR 3/1) en seco y negro (10YR 2/1) en húmedo, y en los horizontes superficiales se observa estructura biogénica, migajosa, granular o en bloques subangulares finos, de consistencia friable en seco.

En todos los perfiles se identificaron horizontes móllicos (SSS, 2022) y térricos (WRB). A partir de los 40 cm de profundidad son comunes los revestimientos de arcilla, cuyo origen requiere investigación adicional. También se observó una proporción menor al 5% de artefactos y la presencia de concreciones de carbonatos de calcio en horizontes subsuperficiales, sin alcanzar el desarrollo de un horizonte cálcico, como también han reportado otros estudios (Itkin *et al*., 2022; Sandor, 2006; Sandor y Furbee, 1996).

Cuadro 1. Clasificación de los suelos de terrazas de escorrentía en Santiago Acatepec, Puebla.

Pedón	Clasificación WRB	Clasificación ST	
A1 A2	Terric Anthrosol (*Loamic, Calcic, Escalic, Hipereutric, Luvic*)	Pachic Haplustolls	
A3	Terric Anthrosol (*Loamic, Calcaric, Escalic, Hipereutric, Luvic)*	Thapto-humic Haplustolls	
B1 B2	Terric Anthrosol (*Clayic, Calcaric, Escalic, Hipereutric, Luvic*)	Pachic Haplustolls	
B3	Terric Anthrosol (*Clayic, Escalic, Hipereutric, Luvic*)		
C1 C2		Thapto-humic Haplustolls	
C3	Terric Anthrosol (*Loamic, Escalic, Hipereutric, Luvic*)	Typic Haplustolls	

Las terrazas agrícolas ocupan 2,578 ha, equivalentes a una cuarta parte del territorio comunal, y han eliminado la pendiente en terrenos de lomeríos, cañadas y piedemonte (Figura 1). La clasificación local distingue entre terrazas de ladera y de corriente, que coinciden con la clasificación técnica, y presenta una gran variedad de bordos: de tierra compactada (32%), de piedra o cuaxustle (30%), de piedra sin acomodo (18%), de zanja (11%), de mampostería (3%), de mortero (2%) y de doble zanja (3%).

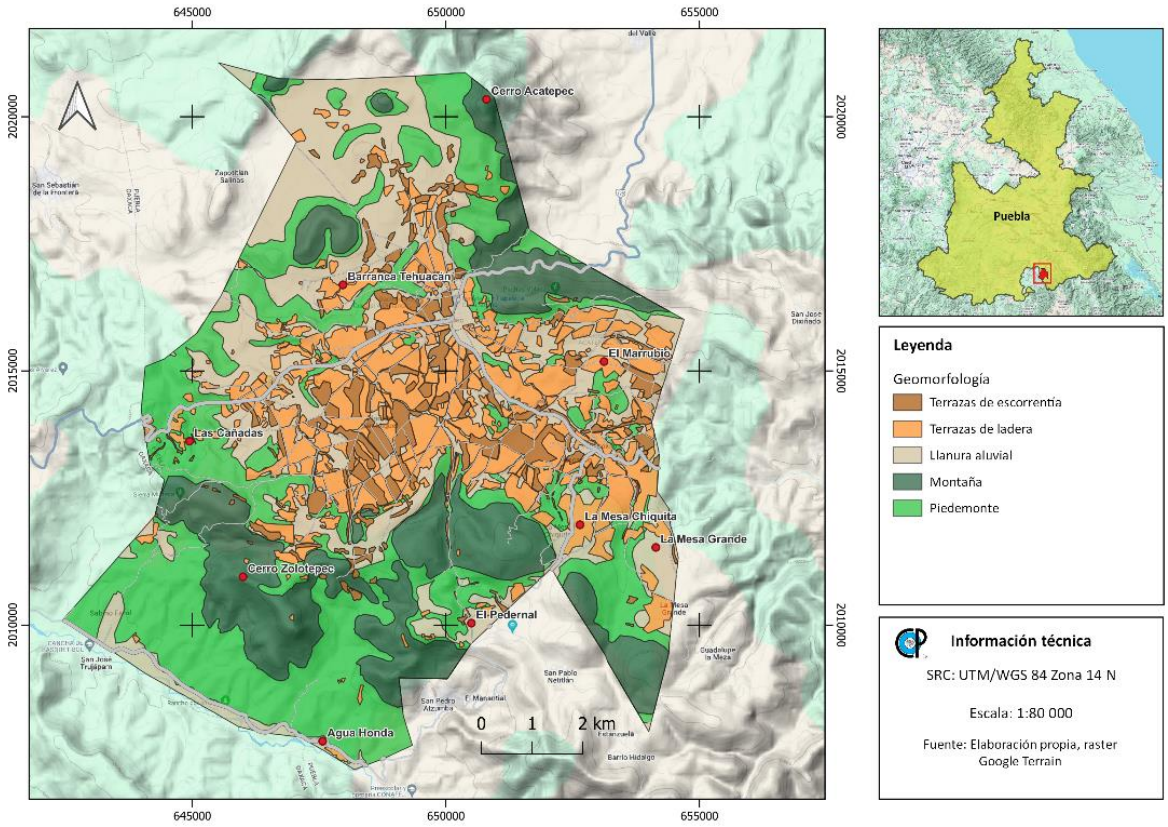


Figura 1. Distribución de las terrazas agrícolas en Santiago Acatepec, Puebla.

CONCLUSIONES

El análisis de los suelos y terrazas agrícolas de la zona de estudio demuestra que estos sistemas son capaces de generar y mantener suelos de alta calidad agrícola a lo largo de la escorrentía. El uso continuado de esta técnica ha contribuido al éxito de la agricultura en un contexto climático semidesértico, lo que evidencia su relevancia tanto productiva como cultural. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de profundizar en el estudio de sus propiedades edafológicas para comprender mejor los procesos que sustentan su fertilidad y resiliencia.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación pudo ejecutarse gracias al financiamiento de la SECIHTI a través de la Beca de Posgrado Nacional para maestría y el apoyo de la Comunidad Agraria de Santiago Acatepec, Caltepec, Puebla.

BIBLIOGRAFÍA

Doolittle, W. E. (1990). Terrace Origins: Hypotheses and Research Strategies. Yearbook. Conference of Latin Americanist Geographers, 16, 94–97. http://www.jstor.org/stable/25765727.

Itkin, D., Poch, R.M., Curtis Monger, H., Shaanan, U., Bolòs, J., Crouvi, O., Ben Hagai, N. & Goldfus, H. (2022). Pedology of archaeological stone-wall bench terraces. *Geoderma,* 428, 116129. https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2022.116129.

IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps (4a ed.). International Union of Soil Sciences (IUSS).

Sandor, J.A. (2006). Ancient Agricultural Terraces and Soils. En B. P. Warkentin (Ed.), Footprints in the Soil People and Ideas in Soil History (1a ed., pp. 505–534). Elsevier.

Sandor, J.A. & Furbee, L. (1996). Indigenous Knowledge and Classification of Soils in the Andes of Southern Peru. *Soil Science Society of America Journal,* 60, 1502–1512. https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000050031x.

Sandor, J.A. & Homburg, J. A. (2017). Anthropogenic Soil Change in Ancient and Traditional Agricultural Fields in Arid to Semiarid Regions of the Americas. *Journal of Ethnobiology,* 37(2), 196–217. https://doi.org/10.2993/0278-0771-37.2.196.

Sandor, J.A., Huckleberry, G., Hayashida, F.M., Parcero-Oubiña, C., Salazar, D., Troncoso, A. & Ferro-Vázquez, C. (2021). Soils in ancient irrigated agricultural terraces in the Atacama Desert, Chile. *Geoarchaeology,* 16(24), 1–24. https://doi.org/10.1002/gea.21834.

SGM. Servicio Geológico Mexicano. (1982). *GeoInfoMex*. Carta Geológico-Minera Orizaba E14-6 Escala 1:250 000. https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/#.

SMN. Servicio Meteorológico Nacional. (2011). *Normales climatológicas por estado*. Normales Climatológicas Estación Acatepec 21002 (1981-2010). https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales_Climatologicas/Normales8110/pue/nor8110_21002.TXT.

SSS. Soil Survey Staff. (2022). Keys to Soil Taxonomy (13a ed.). USDA Natural Resources Conservation Service.

Spencer, J. E. & Hale, G. A. (1961). The origin, nature and distribution of agricultural terracing. *Pacific Viewpoint, 2*(1), 1–40. https://doi.org/10.1111/apv.21001.

Wei, W., Chen, D., Wang, L., Daryanto, S., Chen, L., Yu, Y., Sun, G. & Feng, T. (2016). Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing. In Earth-Science Reviews (Vol. 159, pp. 388–403). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.06.010.

INTERPOLACIÓN ESPACIAL DE PROPIEDADES EDÁFICAS PARA EVALUAR LA GOBERNANZA DE LOS SUELOS DEL COLEGIO DE POSTGRADUADOS, CAMPUS MONTECILLO

Mitzi del Rosario Lupián Machuca[1]; Mariana Tovar Castañón[1]; Nicolás Martínez Maroto[1]; Ismael Rivera Ramírez[2]; Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena[1]; Carlos Alberto Ortiz Solorio[1]

[1] Colegio de Postgraduados campus Montecillo, Posgrado en Edafología, Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, CP. 56264, Texcoco, México.
[2] Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco Núm. 186, Col. Leyes de Reforma 1ª Sección, CP. 09310, Ciudad de México, México.

Correo del autor de correspondencia: lupian.mitzi@colpos.mx

RESUMEN

Conocer la variación espacial de las propiedades de suelos de forma precisa permite implementar prácticas de manejo específicas y sostenibles para cada sitio. Una de las técnicas más eficaces es la interpolación geoestadística mediante kriging. El objetivo fue realizar la interpolación espacial de las propiedades edáficas para evaluar la gobernanza de los suelos del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Se realizó un muestreo sistemático cada 200 m, recolectando muestras a una profundidad de 0-20 cm, excluyendo la zona de edificios. En el laboratorio, se analizaron las variables pH, materia orgánica (MO), densidad aparente (DA) y conductividad eléctrica (CE). Con los datos obtenidos se efectuaron interpolaciones mediante kriging, después de evaluar la distribución de los datos y ajustar los modelos teóricos de semivariograma. Los modelos con mejor ajuste fueron Gaussiano y Bessel. El kriging ordinario fue el método más adecuado para la DA; mientras que, el kriging universal mostró un mejor desempeño para las variables pH, MO y CE. La MO se encuentra en rangos bajos a moderados, el pH varía de moderado a muy fuertemente alcalino y la salinidad de los suelos se clasifica de muy ligera a moderadamente salina por los resultados de CE. Se identificaron tres combinaciones: suelos salinos con baja materia orgánica, suelos salinos con baja materia orgánica y ligeramente salinos con moderada materia orgánica. Esto señala la necesidad de prácticas de manejo orientadas a la recuperación de la calidad del suelo. Se requiere avanzar hacia una gobernanza del suelo para establecer programas de restauración y manejo integral para garantizar la sostenibilidad de los recursos edáficos a largo plazo.

PALABRAS CLAVE: *Geoestadística, kriging, pedometría, predicción espacial.*

INTRODUCCIÓN

Determinar la cantidad y la variación espacial de las propiedades del suelo es importante para una gestión adecuada de los recursos. En el ámbito agrícola, la variación de las propiedades del suelo permite identificar los puntos críticos en los que está disminuyendo su calidad y aplicar prácticas de gestión que minimicen la pérdida de nutrientes (Carroll y Oliver, 2005). Los levantamientos de suelos a nivel detallado (escala

1:20,000), proporcionan información específica de cada serie de suelo (SSS, 2022), pero se requiere información más precisa a nivel de parcela para realizar un modelado agrícola (Varón-Ramírez *et al.,* 2022).

Una herramienta que se utiliza para obtener información más detallada es la interpolación Kriging; esta técnica permite estimar el valor de una variable en un lugar no evaluado en función de su distancia (Vargas Díaz *et al.,* 2023; Thompson *et al*., 2012). Esto significa que, al obtener información puntual, se podrían identificar los suelos donde se están llevando a cabo prácticas de gestión sostenible del suelo o establecer aquellos en los que está disminuyendo la calidad. No obstante, en todo este proceso es importante la colaboración y la acción de los actores clave para garantizar la implementación de políticas que fomenten prácticas y metodologías que regulen el uso del suelo y eviten su degradación (Ortiz-García *et al.,* 2022; FAO, 2021).

El objetivo de este trabajo fue interpolar espacialmente la conductividad eléctrica (CE), la densidad aparente (DA), la materia orgánica (MO) y el pH de los suelos del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, mediante técnicas geoestadísticas, con el fin de identificar puntos críticos y de baja calidad en la gobernanza del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó en el Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Se localiza entre las coordenadas 19°27 '34" y 19°28 '10" latitud norte y 98°53 '40" y 98°55 '30" longitud oeste, a una altitud de 2,230 msnm. La zona se encuentra sobre depósitos piroclásticos del cuaternario, caracterizándose por la presencia de materiales volcánicos y lacustres derivados del ex lago de Texcoco (Siebe *et al.,* 1996).

Se realizó un muestreo sistemático cada 200 m en 188 hectáreas, excluyendo las zonas en las que hay construcciones y edificios. Las muestras de suelo se recolectaron a una profundidad de entre 0 y 20 cm. En total, se obtuvieron 35 muestras, las cuales se secaron y tamizaron para obtener la fracción de tierra fina. En el laboratorio se determinó el pH en una proporción de 2:1 (suelo:agua), la densidad aparente (DA) mediante el método del terrón parafinado, la conductividad eléctrica (CE) en el extracto de la pasta de saturación, y la materia orgánica (MO) con el método de Walkley-Black. Todos estos métodos se extrajeron del manual de procedimientos de Van Reewijk (2002).

La interpolación espacial se realizó en el software R 4.4.3 con Kriging, el cual consiste en los siguientes pasos: 1. Análisis exploratorio de datos para detectar datos atípicos y posteriormente ajustarlos a una distribución normal. 2. Análisis estructural para comparar siete modelos de ajuste de semivariograma: bessel, esférico, exponencial, gaussiano, lineal, matern y pentaesférico. El criterio para la selección del modelo con mejor ajuste fue el error cuadrático medio (RMSE) y la predicción espacial, en donde se realizó inferencia espacial utilizando kriging. Se evaluaron los métodos kriging ordinario, simple y universal, con validación cruzada de cinco submuestras y se obtuvieron errores de predicción. Para la elección del mejor modelo se consideraron el error medio (ME), desviación cuadrática media relativa (MSDR) y RMSE (Pebesma, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La DA mostró una distribución homogénea, lo que sugiere uniformidad en la compactación superficial del suelo. La MO y el pH tienen variabilidad moderada; mientras que CE presenta valores atípicos altos, lo que indica heterogeneidad espacial y presencia de zonas con acumulación de sales (Figura 1). Estos resultados son consistentes con la información de Siebe *et al.* (1996), quienes mencionan que suelos derivados de materiales volcánicos y lacustres tienden a presentar alta variabilidad espacial en CE y MO.

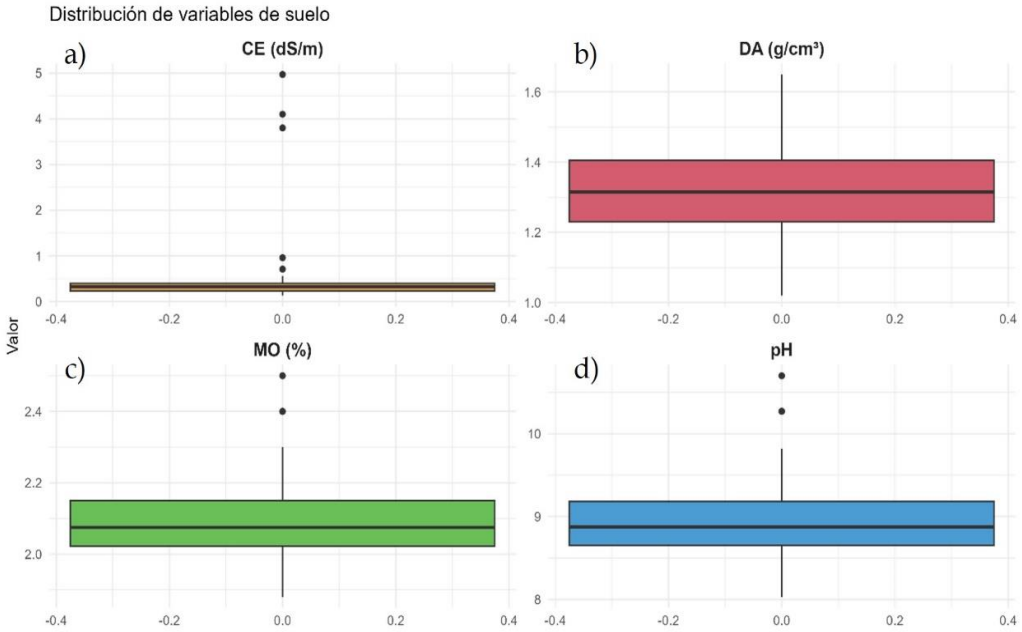


Figura 1. Gráficas de cajas y bigotes para variables de suelo. a) Conductividad eléctrica (CE); b) Densidad aparente (DA); c) Materia orgánica (MO); d) pH.

Los modelos teóricos de semivariograma que mejor se ajustaron fueron el de Bessel para la CE y la MO, y el gaussiano para la DA y el pH. Los datos de pH concuerdan con el estudio de Vega-Blancas *et al.* (2022), mientras que para la CE y la MO los modelos teóricos de semivariograma con mejor ajuste fueron esférico y gaussiano, respectivamente (Cuadro 1). Respecto al kriging, Vega-Blancas *et al.* (2022) realizaron la predicción espacial del pH, la CE y la MO con kriging ordinario, mientras que en el presente estudio el mejor método fue el kriging universal (Cuadro 2).

Cuadro 1. Modelos teóricos ajustados a los semivariogramas.

Variable	MT†	Nugget	Psill	Rango
CE (dS m^{-1})	Bessel	1.35	3.28	621.05
DA (g cm^{-3})	Gaussiano	0.00	0.01	77.12
MO (%)	Bessel	0.00	0.00	493.40
pH	Gaussiano	0.00	0.00	534.78

†MT = modelo teórico de semivariograma; CE = conductividad eléctrica; DA = densidad aparente; MO = materia orgánica.

Cuadro 2. Estadísticas de validación cruzada.

Variable	TK†	ME	MSDR	RMSE
CE (dS m^{-1})	Universal	0.3195	59.1826	11.7077
DA (g cm^{-3})	Ordinario	0.0055	1.4859	0.1500
MO (%)	Universal	0.0006	0.7996	0.0218
pH	Universal	0.0000	0.8501	0.0013

†TK = tipo de kriging; ME = error medio; MSDR = desviación cuadrática media relativa; RMSE = error cuadrático medio; CE = conductividad eléctrica; DA = densidad aparente; MO = materia orgánica.

Según la escala de Hazelton y Murphy (2007), los suelos del Colegio se encuentran en el rango de contenido de MO bajo (1.00-1.70%) y moderado (1.70-3.00%) (Figura 2). Respecto al contenido de sales, se tienen suelos muy ligeramente salinos (0.98-1.71 dS m^{-1}), ligeramente salinos (1.71-3.16 dS m^{-1}) y moderadamente salinos (3.16-6.07 dS m^{-1}) (USDA-NRCS, 1999). En cuanto al pH, de acuerdo con Ortiz-Solorio (2019), los suelos son: moderados alcalinos (8.0-8.5), fuertemente alcalinos (8.5-9.0) y muy fuertemente alcalinos (> 9.0).

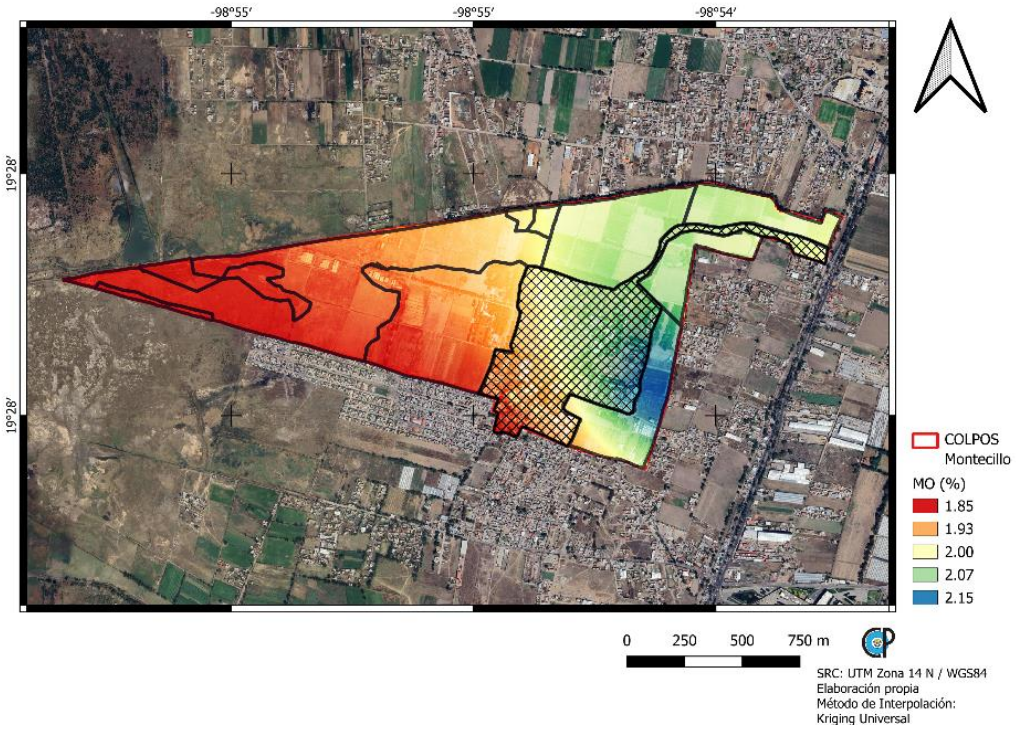


Figura 2. Distribución espacial de materia orgánica.

CONCLUSIONES

Mediante la interpolación espacial de las variables físicas y químicas del horizonte superficial de los suelos del campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, se observó que la zona agrícola más crítica en cuanto a gobernanza es la parte media, debido a su bajo contenido de materia orgánica e incremento de la salinidad. Las mejores áreas se localizan en la entrada del campus, donde se practica la labranza de conservación.

BIBLIOGRAFÍA

Carroll, Z.L. & Oliver, M.A. (2005). Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity. *Geoderma,* 128(3–4), 354–374. https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2005.03.008.

FAO. (2021). Take Urgent Action to Combat Climate Change and Its Impacts. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Hazelton, P. & Murphy, B. (2007). Interpreting Soil Results. What do all the numbers mean? CSIRO Publishing.

Ortiz-García, S., Saynes Santillan, V., Bunge Vivier, V., Anglés-Hernández, M., Pérez, M.E. & Prado, B. (2022). Soil governance and sustainable agriculture in Mexico. *Soil Security,* 7, 100059. https://doi.org/10.1016/j.soisec.2022.100059.

Pebesma, E.J. (2004). Multivariable geostatistics in S: The gstat package. *Computers and Geosciences,* 30(7), 683–691. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.03.012.

Siebe, C., Rosales-Lagarde, L., & Schaaf, P. (1996). Late Holocene paleoenvironments of the former lake Texcoco. *Quaternary Research,* 46(1), 65–75. https://doi.org/10.1006/qres.1996.0043.

Ortiz-Solorio, C.A. (2019). Edafología: la ciencia del suelo, clasificación, métodos de estudio. Editorial Trillas. 400 p.

Thompson, J.A., Roecker, S., Grunwald, S. & Owens, P.R. (2012). Digital soil mapping: Interactions with and applications for hydropedology. In H. Lin (Ed.), Hydropedology: Synergistic Integration of Soil Science and Hydrology (pp. 665–709). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386941-8.00021-6.

USDA-NRCS. (1999). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. (Luters, A., Salazar, J.C. & Plaza, L. Trans.).

Van-Reewick, L.P. (2002). Procedures for soil analysis. (6th ed.). International Soil Reference and Information Center.

Vargas-Diaz, R.E., Galindo-Pacheco, J.R., Giraldo-Henao, R., Varón-Ramírez, V.M., Wilches-Ortiz, W.A. & Franco-Florez, C.V. (2023). Metodologías de interpolación y predicción espacial para el análisis de las propiedades físicas del suelo en la hoya del río Suárez (Colombia). *Siembra*, 10(1), e4118. https://doi.org/https://doi.org/10.29166/siembra.v10i1.4118.

Varón-Ramírez, V.M., Araujo-Carrillo, G.A. & Guevara, M. (2022). Colombian soil texture: Building a spatial ensemble model. *Earth System Science Data Discuss,* 4719–4741. https://doi.org/10.5194/essd-2021-437.

Vega-Blancas, V. de J., Fernández-Reynoso, D.S., Macedo-Cruz, A., Ríos-Berber, J.D. & Ruiz-Bello, A. (2022). Soil fertility analysis by validation and Kriging interpolation of soil parameters. *Terra Latinoamericana,* 40, 1–12. https://doi.org/10.28940/TERRA.V40I0.1573.

DIVERSIDAD DE SUELOS Y SERVICIOS ECOSISTÉMICOS: IMPLICACIONES PARA LA GESTIÓN SOSTENIBLE DE SUELOS EJIDALES EN TEPEZALÁ, AGUASCALIENTES

Marco Antonio Meraz Mercado[1]; Armando López Santos[2]; Araceli Guadalupe Mendieta Vázquez[1]; Jorge Alejandro Torres González[1]; Hugo Alonso Tapia[1]; Antonio de Jesús Meraz Jiménez[1]

[1] Centro de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Aguascalientes, La Posta, Km 8.5 C.P. 20920, Jesús María, Aguascalientes, México.
[2] Universidad Autónoma Chapingo. Unidad Regional de Zonas Áridas. Apdo. Postal 8, C.P. 35230. Bermejillo, Durango, México.

Correo del autor para correspondencia: jesus.meraz@edu.uaa.mx

RESUMEN

Este estudio investiga la interrelación entre la diversidad de suelos y la provisión de servicios ecosistémicos (SE) en tierras ejidales de Tepezalá, Aguascalientes. Se utilizó un análisis espacial en R con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Secretaría de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Agua (SSMA) para analizar la relación entre grupos de suelo, la vegetación y los SE. Reconociendo que los SE son bienes y servicios para el bienestar comunitario, con la creciente presión sobre estos servicios debido al desarrollo urbano, la deforestación y la agricultura intensiva. Se empleó una combinación de trabajo de campo para la descripción de perfiles y recolección de muestras de suelo; análisis de laboratorio para determinar propiedades físicas y químicas, y métodos participativos con ejidatarios para la evaluación de SE. Los resultados revelan heterogeneidad edáfica, con predominio de Leptosols, Calcisols y Luvisols, cada uno con distintas capacidades para la provisión de SE. Se observó que el uso actual del suelo, principalmente agricultura de temporal y pastoreo extensivo, condiciona la expresión de estos servicios, generando algunos antagonismos como la intensificación agrícola en suelos someros que conduce a la erosión. Los SE de regulación, como el control de la erosión y la regulación hídrica, se encuentran comprometidos en varias áreas. Se concluye que la gestión sostenible de los recursos requiere estrategias específicas que consideren la diversidad edáfica, integren el conocimiento tradicional y fomenten prácticas que optimicen las sinergias entre SE.

PALABRAS CLAVE: *Análisis espacial; ejidos; participación social; seguridad alimentaria; sobrepastoreo.*

INTRODUCCIÓN

El suelo es un componente crítico de los ecosistemas terrestres y un recurso natural no renovable, que resulta esencial para el desarrollo de la vida y el sustento. Los suelos sanos son la base de la provisión de numerosos servicios ecosistémicos (SE), definidos estos como los bienes y servicios que las comunidades locales obtienen de los sistemas

ecológicos para su bienestar (MEA 2005). Sin embargo, el incremento de las actividades humanas ha provocado impactos negativos en el funcionamiento de los ecosistemas. La explotación de los recursos naturales busca mejorar la calidad de vida, especialmente en las zonas rurales. Por otra parte, el crecimiento de las ciudades ha intensificado la deforestación, la expansión de tierras cultivadas y la ocupación de cuerpos de agua, lo que ha debilitado la provisión de estos servicios (Liu *et al.,* 2021). La pérdida de estos servicios es una de las principales consecuencias del manejo inadecuado de los ecosistemas, lo que afecta la seguridad ecológica y social de las regiones. Acciones como la expansión del regadío y la agricultura intensiva, pueden agravar la escasez de agua y favorecer fenómenos como las tormentas de arena, si no se tienen en cuenta las condiciones ambientales locales (Li *et al.*, 2025). Además, las contribuciones económicas de la biodiversidad suelen pasar desapercibidas debido a la falta de valoración de sus beneficios en el mercado, lo que lleva a tomar decisiones erróneas en la gestión de los ecosistemas (Dietrich *et al*., 2025). Por otro lado, los propietarios de tierras tienen diversas motivaciones económicas y sociales, por lo que necesitan información cuantificable que les permita valorar y gestionar los SE de manera eficiente (Whiteis *et al.,* 2025). En México, más de la mitad del territorio, incluyendo vastas áreas agrícolas, bosques y de pastoreo, se encuentra bajo el régimen de tenencia ejidal, destacando que los ejidos son una forma de propiedad comunal de la tierra establecida tras la Revolución Mexicana y sus poseedores. Por eso, los ejidatarios, juegan un papel crucial en la gestión de esos recursos naturales del país. A menudo, los ejidos se caracterizan por altos niveles de marginación, parcelas de tierra muy fragmentadas, acceso limitado a capital, tecnología y mercados, lo que les obliga a adoptar prácticas productivas que degradan los recursos naturales, incluido el suelo (Conanp, 2015). Sin embargo, existe un vacío de estudios a escala ejidal y una carencia de información adecuada, tanto a escala local como regional, sobre los factores que determinan la provisión de servicios ecosistémicos. Muchos ejidos se enfrentan a la presión provocada por la expansión agrícola y urbana, pero existen vacíos en las herramientas de gestión adaptadas a su contexto socioecológico (Marrero-Rodríguez *et al*., 2021). Este estudio no solo identifica SE asociados a los suelos, sino que integra perspectivas locales para fortalecer la autonomía de los ejidos. Ante este panorama, el objetivo de este trabajo es identificar y caracterizar la diversidad de suelos en áreas ejidales de Tepezalá, así como su relación con los SE, con el fin de fortalecer la toma de decisiones de los ejidatarios en la gestión sostenible de sus tierras.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se llevó a cabo en el municipio de Tepezalá, que se localiza en la porción nororiental del estado de Aguascalientes, México. Cuenta con 22,485 habitantes distribuidos en 15 núcleos agrarios, de los cuales 11,371 son mujeres y 11,114 son hombres (INEGI, 2020). Las coordenadas extremas son 22°13'27'' N y 102°10'01'' W, a una altitud de 2,101 msnm. El clima es del tipo BS1kw, semiseco templado, con un rango de temperatura de entre 14 y 18 °C y precipitaciones de entre 400 y 600 mm. Forma parte de la provincia de la Mesa Central, que presenta dos características de relieve: zonas semiplanas, localizadas al sureste, norte y oeste del municipio, que representan el 85%

del territorio, y zonas montañosas, localizadas en la parte oriental del municipio y que cubren el 15% de la superficie restante Se utilizaron datos geoespaciales, procesados y analizados con el software R (versión 4.1.1) con las paqueterías sf, terra y tidyverse. El polígono del estado de Aguascalientes se obtuvo a partir del marco geoestadístico nacional (INEGI, 2024). También, se emplearon las cartas de uso de suelo y vegetación (USV), serie VII, escala 1:250,000 (INEGI, 2018), y la carta edafológica (escala 1: 50,000) del estado de Aguascalientes (SSMA, 2019) para obtener los Grupos de Suelos de Referencia (GSR) y el uso de suelo de la región. Finalmente, se realizó una revisión de la literatura científica para identificar los servicios ecosistémicos asociados a los grupos de suelos determinados en el área de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la superficie de los grupos de suelo y su relación con la vegetación proporciona a los ejidatarios información para tomar decisiones sobre la gestión de los servicios ecosistémicos que pueden obtener de sus tierras. Los Regosols son el grupo de suelos dominante en Tepezalá y, al igual que los Leptosols, tienen un menor potencial agrícola. En los Fluvisols y los Phaeozems se concentra la agricultura de riego y temporal, respectivamente; mientras que, los Cambisols y Durisols se asocian principalmente a pastizales y matorrales (Cuadro 1).

Cuadro 1. Distribución de los usos de suelo por grupo de suelos en Tepezalá, Ags.

	C†	D	Fl	L	Ph	Pl	R
USV	----------%----------						
Desprovisto de vegetación	4.70	0	0	3.10	0	0	2.27
Matorral crasicaule	39.70	26.40	9.25	46.49	26.71	4.33	51.77
Pastizal	55.6	41.38	0.49	37.36	0	1.37	31.21
Agricultura de riego	0	1.59	51.71	0	0	0	0
Agricultura de temporal	0	26.69	37.00	1.36	73.29	94.30	12.61
Asentamientos humanos	0	3.93	1.46	1.24	0	0	0.83
Vsabe	0	0	0.09	10.38	0	0	1.10
Cuerpo de agua	0	0	0	0.06	0	0	0.20
Total	100	100	100	100	100	100	100

† C = Cambisols, D = Durisols, F = Fluvisols, L = Leptosols, Ph = Phaeozems, Pl = Planosols, R = Regosols, USV = uso de suelo y vegetación, Vsabe = Vegetación secundaria arbustiva bosque de encino.

Los suelos con un uso predominantemente agrícola (Fluvisols y Phaeozems) contribuyen en gran medida a la seguridad alimentaria y a la regulación del agua (Cuadro 2), lo que refleja su importancia para la producción de alimentos. La alta productividad de los Phaeozems coincide con los resultados de estudios realizados en el Bajío mexicano (Pérez-Salinas *et al.*, 2020). Estos suelos deben gestionarse de manera sostenible para mantener su alta productividad agrícola y su contribución a la seguridad alimentaria. Simion *et al*. (2023) mencionan que en la política y en la gestión del paisaje se deben tener en cuenta los efectos de la escala para abarcar la complejidad estructural, funcional y social de los ecosistemas y sus beneficios. Esto contribuirá, en última instancia, a identificar las zonas que deben protegerse, restaurarse o gestionarse de forma

sostenible. Los suelos destinados a pastizales y matorrales (Cambisols, Leptosols y Regosols) contribuyen principalmente a la generación de biomasa vegetal y a la regulación del ciclo del agua, pero su aportación a la seguridad alimentaria es limitada. Lo que se espera de una economía que funcione correctamente y de un mundo justo es que el comercio contribuya a mejorar los niveles de producción y consumo, así como el bienestar general, con un crecimiento de la productividad y la especialización. Sin embargo, ciertas vulnerabilidades deben tenerse en cuenta y ciertos riesgos e incertidumbres, que también deben formar parte de las opciones de cada sociedad, donde las consideraciones territoriales y el enfoque de la producción alimentaria merecen especial atención (Pacheco de Carvalho, 2016).

Cuadro 2. Grupo de suelo y valoración de los diferentes servicios ecosistémicos que aporta.*

Grupo de suelo	Servicio principal	Alimento	Clima	Agua	Cultura	Total
Cambisol	Seguridad alimentaria	3	2	3	1	9
Durisol	Poca contribución	1	1	1	1	4
Fluvisol	Seguridad alimentaria	4	2	4	2	12
Leptosol	Escorrentía pluvial	1	1	2	1	5
Phaeozem	Seguridad alimentaria	4	4	3	1	12
Planosol	Poca contribución	1	1	1	1	4
Regosol	Biomasa	2	1	1	1	5

Fuente: datos tomados del mapa de suelos de Aguascalientes* SSMAA (2019), Hiederer, R. y Kochy, M. 2011. * La valoración se hace en la escala 0 a 5, en la que el 5 es el máximo valor asignado.

CONCLUSIÓN

Este estudio ha demostrado la significativa diversidad de los suelos de Tepezalá y cómo esta diversidad, en interacción con el uso y manejo del suelo, determina la capacidad de proveer una amplia gama de servicios ecosistémicos esenciales para el bienestar humano y la integridad ambiental. La provisión de estos servicios, especialmente los de regulación, como el control de la erosión y la regulación hídrica, se encuentra comprometida en muchas áreas debido a prácticas de gestión no sostenibles, exacerbadas por las condiciones semiáridas de la región. Por tanto, es crucial gestionar de manera integrada la diversidad de suelos y los SE para fomentar la resiliencia.

Se recomienda implementar estrategias de manejo sostenible diferenciadas y fortalecer el conocimiento local para promover la autonomía ejidal, la seguridad alimentaria y la adaptación al cambio climático. Para ello, es necesario un compromiso multisectorial y multinivel, que involucre activamente a las comunidades locales en la toma de decisiones y en la implementación de acciones.

BIBLIOGRAFÍA

Conanp. (2015). Valoración de Servicios Ecosistémicos: Un Enfoque para Fortalecer el Manejo de las Áreas Naturales Protegidas Federales de México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.

Dietrich, A.S., Carini, V., Vico, G., Bommarco, R. & Hansson, H. (2025). Changing the understanding of crop production: Integrating ecosystem services into the production function. *Ecological Economics,* 230, 108526. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2025.108526

Hiederer, R. & Kochy, M. (2011). Global soil organic carbon estimates and the harmonized world soil database. European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. Publication Office of the European Union.

Li, X., Li, X., Li, X., Dong, Z., Chen, X., Guo, J. & Liu, H. (2025). Spatiotemporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their determining thresholds across distinct climate zones in the temperate desert steppe of northern China. *Ecological Indicators*, 170, 113099. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113099.

Liu, R., Dong, X., Wang, X., Zhang, P., Liu, M. & Zhang, Y. (2021). Study on the relationship among the urbanization process, ecosystem services and human well-being in an arid region in the context of carbon flow: Taking the Manas River basin as an example. *Ecological Indicators,* 132, 108248. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108248.

Marrero-Rodríguez, N., Peña-Alonso, C., García-Romero, L., Sánchez-García, M.J. & Pérez-Chacón E., E. (2021). Historical social relevance of ecosystem services related to long term land uses in a coastal arid aeolian sedimentary system in Lanzarote (Canary Islands, Spain). *Ocean & Coastal Management*, 210, 105715. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105715.

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). Ecosystems and human well-being: Synthesis. Island Press. ISBN 1-59726-040-1.

Pacheco de Carvalho, B.R. (2016). Local economic development and sustainable global development: Food security and food sovereignty. In 2016 International European Forum. International European Forum on System Dynamics and Innovation in Food Networks.

Pérez-Salinas, J.E., Rodríguez, F.R., López-Santos, A., Torres-González, J.A., Meraz-Jiménez, A.J., Díaz-Romo, A. & Valdivia-Martínez, O. (2019). Erodabilidad y riesgo de erosión de suelos negros del centro de México: estudio de un Phaeozem. *Terra Latinoamericana*, *37*(4), 391-400. Epub 24 de marzo de 2020.https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.531.

Simion, H., Giombini, V., Tasser, E., Marsoner, T. & Egarter-Vigl, L. (2023). Enhancing understanding of ecosystem multifunctionality in mountain regions. *Ecological Solutions and Evidence*, 4(3), e12265. https://doi.org/10.1002/2688-8319.12265.

SSMAA (Secretaría de Sustentabilidad Medio Ambiente y Agua). (2019). Mapa de suelos del estado de Aguascalientes. Escala 1:50,000. Aguascalientes, Ags.

Whiteis, A. M., Zou, C. B., Joshi, O., Ferguson, B. & Roberts, S. (2025). Quantitative assessment of ecosystem services in diverse land uses within the forest-grassland transition zone of southern Great Plains, USA. *Ecosystem Services*, 71, 101697. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2025.101697.

EVALUACIÓN DEL MANEJO AGRONÓMICO EN HORIZONTE Ap MEDIANTE MACROMOSAICOS DIGITALES *IN SITU*

Vicente Vidal Encinia Uribe[1]; Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena[1]; Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena[2]; Gustavo Andrés Ramírez Gómez[2]; María Fernanda Godínez Montemayor[1]; Diego Emilio Pérez Martínez[1]; Rocío Citlali Gutiérrez de la Garza[3]

[1] Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, C.P. 66050, Nuevo León, México.
[2] Colegio de Postgraduados, Car. México-Texcoco, km 36.5, Montecillo, C.P. 56240, México.
[3] Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán, CP 04510, CDMX, México.

Correo de autor de correspondencia: vicente.enc iniaur@uanl.edu.mx

RESUMEN

El estudio analiza la influencia del manejo agrícola en la estructura y funcionalidad del horizonte Ap de suelos bajo diferentes sistemas productivos. Se examinaron tres parcelas con distintas prácticas: agricultura de conservación, labranza mecanizada tradicional y agricultura tradicional con aportes intensivos de materia orgánica (MO). Se caracterizaron perfiles pedológicos y se empleó una metodología de captura de imágenes *in situ* para evaluar la morfología edáfica. Los resultados evidencian que el suelo con altos aportes de MO presenta estructuras granulares y bloques subangulares finos, mayor porosidad y penetración radical hasta los 50 cm de profundidad, favoreciendo la infiltración y la retención hídrica. En contraste, la labranza mecanizada tradicional mostró poros intersticiales hasta los 35 cm y una estructura colapsada. La integración de macrofotomosaicos y clasificación supervisada complementó la descripción cualitativa de los perfiles de suelo, permitiendo estudios edáficos más rigurosos y precisos. Estos hallazgos confirman que la acumulación de MO mejora la estabilidad estructural y la fertilidad edáfica. Se enfatiza la necesidad de metodologías no destructivas que integren análisis microscópico y macroscópico para una caracterización más exhaustiva del suelo y su impacto en la productividad agrícola y la sostenibilidad.

PALABRAS CLAVE: *Labranza de conservación, labranza mecanizada, materia orgánica, microfotomosaicos.*

INTRODUCCIÓN

En la última década, ha aumentado el interés por la conservación de los recursos naturales y la adopción de prácticas agropecuarias sostenibles, reflejando una creciente preocupación global por la seguridad alimentaria y la sostenibilidad ambiental. Este cambio de paradigma resalta la importancia de la planificación de agroecosistemas y la evaluación del potencial productivo del suelo en diferentes condiciones climáticas (Ye *et al.*, 2022; Kimambo *et al.*, 2020).

La ciencia del suelo, con poco más de un siglo de desarrollo, ha evolucionado significativamente, desde el estudio macroscópico de los perfiles pedológicos hasta la micromorfología (Kubiëna, 1938), que analiza características a escala microscópica. Estas aproximaciones cualitativas, complementadas con análisis físicos y químicos cuantitativos, han profundizado el conocimiento del medio edáfico (Loaiza *et al*., 2015).

En este contexto, han surgido técnicas innovadoras que emplean sensores y tecnologías digitales para cuantificar los componentes del suelo, como la materia orgánica, el carbono orgánico, los nutrientes, los minerales, los poros y las raíces, dando lugar a la morfometría digital del suelo (Hartemink y Minasny, 2014). Herramientas como el análisis hiperespectral (Xu *et al.,* 2020; Sorenson *et al.,* 2020), la tomografía computarizada (Chirol *et al.,* 2021; Menon *et al.,* 2020) y la espectrometría PXRF (Sun *et al.,* 2020) han impulsado el desarrollo de la morfometría digital del suelo, aunque enfrentan retos como altos costos o técnicas destructivas.

A pesar de los avances tecnológicos, persiste un desafío clave: desarrollar una metodología integral, no destructiva y completamente In situ que integre el análisis microscópico y macroscópico del suelo. Este objetivo, considerado el "Eslabón Perdido" o el "Santo Grial" del estudio edáfico, representa un área crucial de investigación para avanzar en la comprensión de las propiedades del suelo y su impacto en la productividad agrícola y la sostenibilidad ambiental (Baveye *et al.,* 2022; Baveye *et al.,* 2018).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio. Tres parcelas agrícolas fueron seleccionadas de la misma serie de suelo, con diferente sistema de producción agrícola: A) Agricultura de Conservación (19°27′59″ N, 98°53′44″ W); B) Labranza Mecanizada Tradicional (19°26′50″ N, 98°52′43″ W); y C) Agricultura tradicional con aportes intensivos de MO (19°27′10″ N, 98°52′38″ W). Las parcelas están ubicadas en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Edo. de México (2,250 msnm) con un régimen de humedad ústico y temperatura isotérmica (SMN, 2010).

Perfiles Pedológicos. Se realizaron tres perfiles pedológicos (1 m ancho x 2 m largo x 1.20 m profundidad) y se caracterizaron de acuerdo con el manual de descripción de perfiles de suelo (Cuánalo, 1990). Posteriormente, las muestras alteradas e inalteradas de cada horizonte genético fueron extraídas con una pala recta y trasladadas al laboratorio en bolsas de polietileno transparentes. Las muestras se secaron a la sombra a temperatura ambiente, posteriormente se tamizaron para obtener la fracción fina del suelo (<2 mm). Finalmente se almacenaron en un lugar fresco y seco hasta su análisis físico y químico.

Imágenes Digitales. La captura de microfotografías se realizó *in situ* con una nueva metodología desarrollada por nosotros. Se usó una cámara digital (DSLR Nikon D7200) montada sobre un tripié móvil de tres ejes (x, y, z) y utilizando un lente AF-S DX Micro NIKKOR 85mm f/3.5G ED VR con teleobjetivo macro. Los mosaicos se realizaron con imágenes de los primeros 50 cm de profundidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los perfiles de suelo de las parcelas de los tres sistemas de producción se observan en la Figura 1.

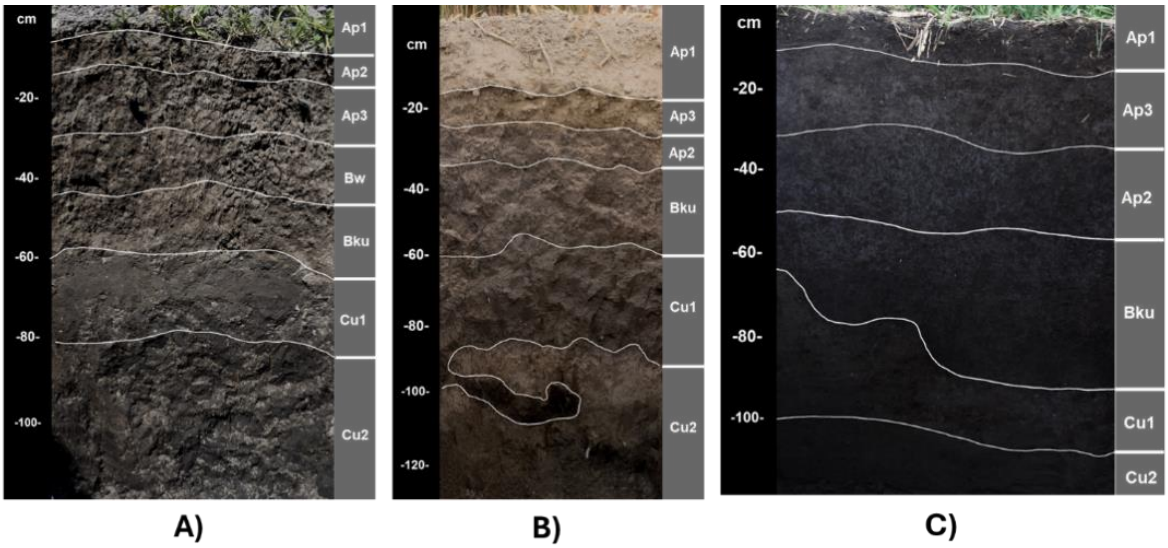


Figura 1. Perfiles de suelo del sistema de producción agrícola: A) Agricultura de Conservación; B) Labranza Mecanizada Tradicional; y C) Agricultura tradicional con aportes intensivos de MO.

El perfil de suelo con altos aportes de materia orgánica (MO) mostró un mayor desarrollo del horizonte Ap, evidenciado por una estructura granular y bloques subangulares finos, abundante porosidad y la presencia de raíces hasta los 50 cm de profundidad. En contraste, el perfil de suelo con labranza mecanizada tradicional presentó un buen sistema de poros intersticiales hasta los 35 cm de profundidad, a diferencia de lo reportado por López *et al.* (2018), quienes atribuyen la formación de una estructura colapsada al mantenimiento de una labranza convencional.

El desarrollo del horizonte Ap favorece el crecimiento óptimo de los cultivos al generar estructuras adecuadas, como granular, migajosa y bloques subangulares pequeños, características observadas en los tres perfiles pedológicos analizados. Estas estructuras resultan de la actividad biológica, promovida por la presencia de raíces y mesofauna. Asimismo, la abundante porosidad con diámetros variables facilita la infiltración y la retención de humedad. Según Rabot *et al.* (2018), estos factores son indicadores clave de las funciones del suelo, al mejorar su fertilidad y favorecer el crecimiento radical de las plantas.

Nehrani *et al.* (2020) destacan que la capacidad productiva del suelo es esencial para prevenir su degradación, ya que la cobertura vegetal, ya sea con cultivos básicos o pastizales, contribuye a la seguridad alimentaria. Este principio coincide con el manejo de las tres parcelas analizadas, donde se mantuvieron residuos de cosecha al término del ciclo agrícola.

Por otro lado, Norris *et al.* (2015) señalan que los suelos calcáreos son particularmente sensibles a las perturbaciones. Factores como la disminución de MO y los altos contenidos de arcilla pueden propiciar su compactación. Sin embargo, los suelos calcáreos estudiados en este análisis no presentan evidencia de compactación, gracias a la actividad biológica estimulada por la humedad constante a lo largo del año.

Finalmente, Eeswaran *et al*. (2021) afirman que la labranza cero es el tratamiento más eficiente para promover la retención de humedad, mitigar los efectos de la sequía y mantener o incluso aumentar el rendimiento de los cultivos. No obstante, en la parcela con altos aportes de MO, se observan estas mismas características a pesar de manejarse bajo un esquema de labranza mecanizada tradicional.

Macrofotomosaico. El macrofotomosaico *in situ* está compuesto por 10 imágenes secuenciales, lo que representa una superficie de 1,000 cm^2, correspondiente al horizonte Ap del perfil del suelo de labranza de conservación. Se logró procesar campos visibles secuenciales reales con macroobjetivo. Se generó un mapa temático para identificar porosidad, agregación y raíces. Se pueden observar poros cámara y vesiculares de tamaños medios, finos y muy finos cubriendo un área del 30% del mosaico total; otros como agregados en bloques subangulares y granulares de tamaño mediano y finos, fuertemente desarrollados y parcialmente acomodados, en un área de 60%; y raíces gruesas, medias, finas y muy finas, con sólo el 10% del área total clasificada. La descripción del macromosaico *in situ* utiliza terminologías de escala morfológica y cuantificadas con técnicas de análisis de imágenes micromorfométricas, adaptadas a una nueva escala de observación.

CONCLUSIONES

El desarrollo de horizontes Ap en suelos agrícolas está favorecido por la actividad biológica y los aportes constantes de MO. Los macromosaicos son una metodología que puede brindar información complementaria a la descripción de perfiles suelo que hasta ahora sigue siendo meramente cualitativa, ofreciendo la oportunidad de considerar datos cuantitativos para realizar estudios más precisos. La clasificación supervisada es una herramienta útil para identificar componentes del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

Baveye, P.; Balseiro-Romero, M., Bottinelli, N., Briones, M., Capowiez, Y., Garnier, P., ... & Vogel, H. J. (2022). Lessons from a landmark 1991 article on soil structure: distinct precedence of non-destructive assessment and benefits of fresh perspectives in soil research. *Soil Research,* 60(4), 321-336.

Baveye, P., Otten, W., Kravchenko, A., Balseiro, M., Beckers, É., Chalhoub, M., Darnault, C., Eickhorst, T., Garnier, P., Hapca, S., Kiranyaz, S., Monga, O., Mueller, C., Nunan, N., Bote, V., Schüter, S., Schmidt, H. & Vogel, H. (2018). Emergent Properties of Microbial Activity in Heterogeneous Soil Microenvironments: Different Research Approaches Are Slowly Converging, Yet Major Challenges Remain. *Frontiers in Microbiology,* 9, 1929, 1-48.

Chirol, C., Carr, S., Spencer, K. & Moeller, I. (2021). Pore, live root and necromass quantification in complex heterogeneous wetland soils using X-ray computed tomography. *Geoderma,* 387, 114898.

Cuanalo, D.L.C. (1990). Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 40 p.

Eeswaran, R., Nejadhashemi, P., Alves, F. & Saravi, B. (2021). Evaluating the applicability of soil moisture-based metrics for gauging the resiliency of rainfed agricultural systems in the midwestern United States. *Soil and Tillage Research,* 205, 104818.

Hartemink, A. & Minasny, B. (2014). Towards digital soil morphometrics. *Geoderma,* 230-231, 305-317.

Kimambo, N., L'Roe, J., Naughton, L. & Radeloff, V. (2020). The role of smallholder woodlots in global restoration pledges–Lessons from Tanzania. *Forest Policy and Economics,* 115, 102144.

Kubiëna, W. (1938). Micropedology. Collegiate Press, Ames, Iowa. 272 p.

Loaiza, J., Stoop, G., Poch, R. & Casamitjana, M. (Eds). (2015). Manual de micromorfología de suelos y técnicas complementarias. Fondo Editorial Pascual Bravo. Medellín, Colombia. 384 p.

López, W., Reynoso, R., López, J., Camas, R. & Tasistro, A. (2018). Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz en la Región Fraylesca, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas,* 9(1), 65-79.

Menon, M., Mawodza, T., Rabbani, A., Blaud, A., Lair, G., Babaei, M., Kercheva, M., Rousseva, S. & Banwart, S. (2020). Pore system characteristics of soil aggregates and their relevance to aggregate stability. *Geoderma,* 366, 114259.

Nehrani, S., Askari, M., Saadat, S., Delavar, M., Taheri, M. & Holden, N. (2020). Quantification of soil quality under semi-arid agriculture in the northwest of Iran. *Ecological Indicators,* 108, 105770.

Norris, C., Maynard, D., Hogg, K., Benton, R., Titus, B. & Curran, M. (2015). Ten-year results of seedling growth on calcareous soils in the interior of British Columbia, Canada. *Forest Ecology and Management,* 346, 65-80.

Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S. & Vogel, H. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. *Geoderma,* 314, 122-137.

SMN. (2010). Normales Climatológicas del estado de México, Estación Montecillo, Periodo 1951-2010. Sistema Meteorológico Nacional (SMN). Recuperado el 28 de octubre del 2024 de https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=mx.

Sorenson, P., Quideau, S., Rivard, B. & Dyck, M. (2020). Distribution mapping of soil profile carbon and nitrogen with laboratory imaging spectroscopy. *Geoderma*, 359, 113982.

Sun, F., Bakr, N., Dang, T., Pham, V., Weindorf, D., Jiang, Z., Li, H. & Wang, Q. (2020). Enhanced soil profile visualization using portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometry. *Geoderma,* 358, 113997.

Xu, S., Wang, M. & Shi, X. (2020). Hyperspectral imaging for high-resolution mapping of soil carbon fractions in intact paddy soil profiles with multivariate techniques and variable selection. *Geoderma,* 370, 114358.

Ye, S., Ren, S., Song, C., Cheng, C., Shen, S., Yang, J. & Zhu, D. (2022). Spatial patterns of county-level arable land productive-capacity and its coordination with land-use intensity in mainland China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 326, 107757.

PROPUESTA DE MODIFICACIÓN A LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS BARRIOS DEL CÓDICE SANTA MARÍA ASUNCIÓN

Miriam Galán Reséndiz[1]

[1] Área de Pedometría y Sensores Remotos, DEIS en Suelos, Universidad Autónoma Chapingo Carr. Federal México-Texcoco, km 38.5, CP. 56230. El Cooperativo, Edo. de México, México.

Correo del autor de correspondencia: mgalanr@chapingo.mx

RESUMEN

El Códice Santa María Asunción contiene una notación pictográfica Nahua dividida en tres secciones: (i) el Tlacatlacuilolli (censo familiar, organizado en barrios), (ii) el Milconcoli (representación de polígonos [parcelas] irregulares, con datos de perímetro) y (iii) Tlahuelmantli (polígonos regulares, con información del área). Williams y Harvey (1997; 1991) en sus estudios sobre este Códice, reportaron 1,505 parcelas; sin embargo, esta cantidad fue sobreestimada al considerar que los polígonos representados en el Milconcoli y Tlacatlacuilolli correspondían a parcelas diferentes, cuando en realidad constituían dos secciones con polígonos de un mismo lugar. El objetivo de este trabajo fue realizar una modificación a la distribución espacial de los barrios que sugirió Williams (1991), con base en la catena de distribución espacial en el paisaje de los glifos de clases de tierra del códice propuesta por Gutiérrez-Castorena (2017) y el levantamiento etnopedológico. El mapa final representa a una superficie de 1,229 ha y la distribución de nueve glifos de clases de tierra: Tezoquitl, Tepetlatlalli, Tlalcoxtli, Xalalli, Tlaixtli, Atoctli, Tetlalli, Tezoquitl/Xalalli, Tepetlatlalli/Xalallicon. Ninguno de los polígonos fue reubicado como lo sugirió Williams; mientras que, el número de parcelas observadas en imágenes de satélite fue menor.

PALABRAS CLAVE: *Cartografía prehispánica; etnopedología; glifos de tierras; levantamiento geomorfológico.*

INTRODUCCIÓN

La población de Tepetlaoxtoc, México, desde la época prehispánica se caracterizó por ser parte de una comunidad multicultural con grupos de diferente origen, la cual desarrolló una de las escrituras glíficas más complejas de Mesoamérica (León-Portilla, 2016). En la actualidad, los códices «Kingsborough», «Vergara» y «Santa María Asunción (CSMA)» se conservan (Tinajero, 2009). El CSMA cuyo título original fue Apeo y Deslinde de las tierras de Santa María Asunción, dibujado en 1544 (Gutiérrez-Castorena *et al*., 2017), contiene una notación pictográfica nahua, dividida en 12 barrios (Williams, 2006), que formaban parte del estado-ciudad de Tepetlaoxtoc (Williams y Hicks, 2011).

El códice se divide en tres secciones: (i) el Tlacatlacuilolli, es decir, el censo familiar; (ii) el Milconcoli, como la representación de polígonos (parcelas), irregulares, con datos de perímetro; y (iii) Tlahuelmantli, una representación de polígonos, regulares, con información del área. Al respecto, Williams y Harvey (1997) indicaron que, cada barrio se asocia a un grupo de jefes de familias de un total de 264 hogares, 1,324 individuos y

1,505 parcelas; sin embargo, esta última cantidad fue sobreestimada, al considerar que los polígonos representados en el Milconcoli y Tlahuelmantli correspondían a parcelas diferentes, cuando en realidad constituyen dos secciones con polígonos de una misma área.

Por otra parte, Gutiérrez-Castorena *et al*. (2017) mencionaron que el valor del CSMA y de Vergara radica en su significado, ya que estos códices son un registro catastral y de censo, respectivamente, de una gran diversidad de tierras en un ambiente volcánico, que fueron clasificadas y representadas pictográficamente. Si bien, existe confusión en el entendimiento de la distribución espacial de los polígonos del Milconcoli, y por ende de las clases de tierra, el trabajo pionero de Williams y Ortiz (1981), junto con otras investigaciones, demostraron que los hombres y mujeres, relacionados con el trabajo de la tierra, identificaban diferentes clases y poseían conocimiento relacionados con su manejo y aprovechamiento. Por lo que, el objetivo de este trabajo fue realizar una propuesta de distribución de los barrios para recalcular las áreas de cada barrio, incluir el número de parcelas presentes en el Milconcoli y Tlahuelmantli, de los barrios faltantes, e identificar los glifos de clases en el mapa elaborado por Williams (1991).

MATERIALES Y MÉTODOS

La propuesta de modificación a la distribución espacial de los barrios reportados en el Códice de Santa María Asunción (CSMA), en el municipio de Tepetlaoxtoc, se realizó tomando como base el mapa de localización de sitios de muestreo en los barrios Cuauhtepuztitla, Antecontla, Chiauahtenco, Chiauhtlan, Tlaltecahuaca, Concotlan, Cuitlahuaca, Tlancomolco, Tepotitla, Capotlan, Tlanchiuhca, Tlatozcac del CSMA (Gutiérrez-Castorena *et al*., 2017), la metodología de la Clasificación Campesina de Tierras (Ortiz-Solorio *et al*., 1991), software ArcGis 10.3 y los mosaicos de imágenes satelitales de Google Earth Pro®. Las áreas de cada barrio se recalcularon y se incluyó el número total de parcelas presentes en el Milconcoli y Tlahuelmantli, de los barrios faltantes; además, se identificaron las clases de tierra presentes en cada uno de ellos, a través de un conteo de forma manual, en el CSMA.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los barrios más grandes del CSMA fueron Cuauhtepuztitla con 38.1% de la superficie del mapa (102.1 ha) y Tlancomolco con el 16% (43.95 ha), y los barrios más pequeños fueron Capotlan con el 1.5% (3.94 ha) y Concoctla con el 2.1% (5.51 ha); los barrios restantes fueron del 3.6% al 8.7% de la superficie (Cuadro 1).

El número total de polígonos representados en el Milconcoli fue de 868, y no de 521 reportados por Gutiérrez-Castorena *et al*. (2017); por otra parte, se tuvieron modificaciones en los barrios Capotlan de 8 a 15 parcelas y Tlanchiuhca de 12 a 31 parcelas; y 347 fueron agregadas por conteo de los barrios faltantes del CSMA. En tanto que los Cuauhtepuztitla y Tepotitla mostraron el mayor número de parcelas con 39.1% y 26.7% del total. El menor número de parcelas se reportó en el barrio Capotlán con tan solo el 1.7%; el resto osciló entre el 1.8% y el 8.6%.

Cuadro 1. Área recalculada en hectáreas y número de parcelas obtenidas a parir de la información generada por Gutiérrez-Castorena *et al*. (2017).

Barrio	Parcelas	Área	
		(ha)	(%)
1 Cuauhtepuztitla	339	102.31	38.1
2 Antecontla	ND	13.85	5.2
3 Chiauahtenco	ND	14.24	5.3
4 Chiauhtlan	ND	16.75	6.2
5 Tlaltecahuaca	24	11.45	4.3
6 Concotlan	16	5.61	2.1
7 Cuitlahuaca	16	9.71	3.6
8 Tlancomolco	75	43.95	16.4
9 Tepotitla	ND	13.28	5.0
10 Capotlan	ND	3.94	1.5
11 Tlanchiuhca	12	23.38	8.7
12 Tlatozcac	ND	9.77	3.6
Total	521	268.24	100

Por otra parte, se identificaron nueve glifos de clases de tierra: Tezoquitl, Tepetlatlalli, Tlalcoxtli, Xalalli, Tlaixtli, Atoctli, Tetlalli, Tezoquitl/Xalalli, Tepetlatlalli/Xalallicon, con ligeras modificaciones entre las secciones Milconcoli y Tlahuelmantli (Gutiérrez-Castorena *et al*., 2017). De los cuales los correspondientes a Tezoquitl, Xalalli y Tezoquitl/Xalalli, se observaron en todos los barrios y el barrio Tlancomolcó presentó todas las clases. Los glifos de tierras, representadas en el CSMA en mayor proporción fueron los Tezoquit con el 21.9% en 190 parcelas, tierras con agregados subangulares/granulares, duros; seguidos de las Tlacoxquitl de clases polvosas con el 15.6% (135 parcelas); Tetlalli con el 15.2%, de tierras pedregosas (132 parcelas) y Tepetlatalil, Suelos de terrazas o de regolita, con el 13.1% (114 parcelas). En tanto que, los glifos menos representados fueron: Tepetlatlalli/Xalalli con el 1.6% de suelos de terrazas o regolita con agregados granulares suaves (14 parcelas) y Tlaixtli con el 3.3% de tierras de colina o sin uso (29 parcelas). En este sentido, los Tepetlatlali pueden representar a los Anthrosols (terrazas) y a las regolitas de los materiales parentales; los Tezoquitl a las tierras o a los bloques subangulares/granulares, duros de > 3 cm; las Tlalcoztlis a las tierras polvosas, de arenas finas, que se formaron de tobas vítricas. Los suelos aluviales activos los representaron como Atoctlis, y los suelos aluviales pasivos como Tezoquitl/Xalalli o Xalallis (Gutiérrez-Castorena *et al*., 2017).

Las parcelas observadas de las clases de tierras Tezoquitl, Tlalcoxtli, Tetlalli y Tepetlatlalli correspondieron al 65% de las parcelas observadas, las cuales se encuentran ubicadas en laderas y colinas, distribuidas en una catena (Figura 1).

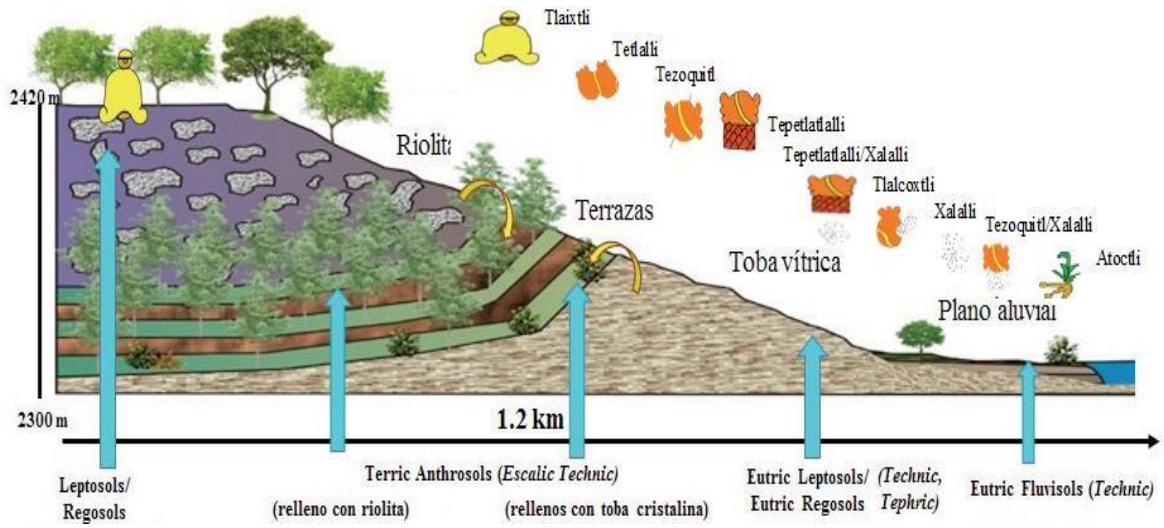


Figura 1. Catena de distribución espacial, en el paisaje, de los glifos de clases de tierra del CSMA para reubicación de los barrios (modificado de Gutiérrez-Castorena *et al*., 2017).

El área recalculada con la nueva distribución de los barrios fue de 1,229 ha, aproximadamente 6 veces más que el área calculada con el mapa de localización de sitios de Gutiérrez-Castorena *et al*. (2017). Uno de los aspectos importantes en nuestra investigación es que, ninguno de los polígonos se reubicó como lo había sugerido Williams (1991). En tanto que, la cantidad de número de parcelas observadas en las imágenes satelitales es notoriamente menor, por ejemplo, en el barrio 9 (Tepotitla), el número de parcelas contadas correspondió a 232; sin embargo, en la imagen satelital se distinguen menos de 15 parcelas, siendo notoria la falta de congruencia entre el número de parcelas y la distribución espacial, aunque las parcelas se pueden agrupar con los nuevos dueños y reducir su cantidad y aumentar su superficie. De igual manera, se corrigió la cantidad de polígonos de los barrios 10 y 11, Capotlán de ocho a 15 y Tlanchiuhca de 12 a 31 polígonos.

CONCLUSIONES

La redistribución de los barrios del CSMA incluye 1,229 ha. Los glifos de tierras, representados en el CSMA en mayor proporción, fueron los Tezoquit con el 21.9% en 190 parcelas. En tanto que los glifos menos representados fueron: Tepetlatlalli/Xalalli con el 1.6% de suelos de terrazas o regolita con agregados granulares suaves (14 parcelas) y Tlaixtli con el 3.3% de tierras de colina o sin uso (29 parcelas). Sin embargo, ninguno de los polígonos fue reubicado como se sugirió en otros trabajos, en tanto la cantidad de parcelas observadas en las imágenes satelitales es menor.

BIBLIOGRAFÍA

Gutiérrez Castorena, M.C., Ortiz Solorio, C.A., Fernández Galán, B.S., Gutiérrez Castorena, E.V. & González Vargas, T. (2017). Los suelos del área de influencia del Códice Santa María Asunción y su representación pictórica. *Terra Latinoamericana,* 35(2), 101-111.

León-Portilla, M. (2016). Toltecáyotl: Aspectos de la cultura náhuatl. Colección Antropología. México, D. F: Fondo de Cultura Económica.

Ortiz, S. C.A., Pájaro, H., D. & Ordaz, V.M. (1991). Manual para la Cartografía de Clases de Tierras. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México: Colegio de Posgraduados.

Tinajero, M.J.O. (2009). La vicaría dominica de Tepetlaoxtoc, eremitismo y evangelización ¿Contradicción o complemento? *Estudios de Historia Novohispana, 41*(041).

Williams, B.J. & Hicks, F. (2011). El Códice Vergara: edición facsimilar con comentario: pintura indígena de casas, campos y organización social de Tepetlaoztoc a mediados del siglo XVI. *Ethnohistory,* 60 (2): 332-333.

Williams, B.J. 1991. The lands and political organization of a rural Tlaxilacalli in Tepetlaoztoc, c A.D. 1540.

Williams, B.J. 2006. Aztec soil knowledge: Classes, management, and ecology. pp. 17-41. In: B. P. Warkentin (ed.). Footprints in the soil: People and ideas in the soil history. Elsevier. Amsterdam, Países Bajos.

Williams, B.J. & Ortiz-Solorio, C.A. (1981). Middle American folk soil taxonomy. *Ann. Assoc. Am. Geo.,* 71: 335-358.

Williams, B.J. & Harvey, H.R. (1997) (traducción y comentarios) "Códice de Santa María Asunción". Facsimilar editado por la Universidad de Utah.

EVALUACIÓN DE LA AGREGACIÓN DEL SUELO EN DIFERENTES MANEJOS AGROFORESTALES: UN ENFOQUE MICROMORFOMÉTRICO

Luis Daniel Sánchez Martínez[1]; Tania González Vargas[2]; Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena[3]; Carlos Alberto Ortiz Solorio[3]; Gerardo Cruz Flores[1]; Juan Manuel Valderrabano Gómez[1]; Alma Bella López López[1]

[1] Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Campus II Batalla 5 de Mayo s/n esquina Fuerte de Loreto, Colonia Ejército de Oriente, CP. 09230. Iztapalapa, Ciudad de México, México.
[2] Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, Campus Juriquilla, Boulevard Juriquilla 3001, CP. 76230. Juriquilla, Querétaro, México.
[3] Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco 36.5, CP. 56264. Texcoco, Estado de México, México.

Correo autor de correspondencia: leinadsiul.28@gmail.com

RESUMEN

Las prácticas agrícolas convencionales generan compactación, reducen la retención de humedad y la capacidad productiva del suelo; mientras que los sistemas agroforestales pueden disminuir estos efectos adversos por la integración de enmiendas orgánicas, labranza mínima y el incremento de la cobertura forestal. El efecto de las prácticas de manejo se ha evaluado mediante el análisis tradicional de muestras alteradas que destruyen la estructura original del suelo. Por lo anterior, en esta investigación se cuantificaron los tamaños de agregados mediante el desarrollo y aplicación de técnicas micromorfométricas basadas en el análisis de imágenes de mosaicos de secciones delgadas completas. El estudio se llevó a cabo en tres sistemas de producción: natural, agroforestal y agrícola en el municipio de Zacatlán, Puebla. El sistema agroforestal con manejo orgánico-labranza cero mejoró la estructura debido al incremento de la materia orgánica y la actividad biológica, lo que generó microagregados (55%) y dominó la estructura granular (> 90%). Por el contrario, en el sistema agrícola con fertilización química-labranza convencional se reducen drásticamente los agregados granulares (hasta 5%) y predomina la estructura subangular por la fragmentación mecánica, disminución de la actividad biológica y materia orgánica. La presente investigación es un aporte metodológico con posibilidad de evaluar y cuantificar la agregación mediante el uso de técnicas de análisis de imágenes a partir de muestras inalteradas de suelo.

PALABRAS CLAVE: *Estructura, mapas temáticos, prácticas de manejo.*

INTRODUCCIÓN

La estructura del suelo es el arreglo espacial de los sólidos y espacio poroso en el suelo y representa uno de los indicadores de calidad más importantes debido a su dinamismo, sus propiedades emergentes y su especificidad (Yudina y Kuzyakov, 2023). El análisis de la estructura del suelo permite comprender sus funciones y su relación entre los procesos físicos, químicos y biológicos y la distribución de partículas elementales y el sistema poroso (Vogel *et al.*, 2022). Las prácticas agrícolas afectan la estructura y pueden generar

problemas como la compactación, disminución del contenido de humedad, flujo de agua, aire y de la biota (Okolo *et al.*, 2020). Por otra parte, los sistemas agroforestales representan una alternativa al manejo convencional de labranza, ya que han demostrado mejorar las propiedades físicas como la estructura del suelo. No obstante, los métodos tradicionales se han basado en técnicas que destruyen la arquitectura original del suelo, por lo que es difícil establecer conclusiones más cercanas al entorno natural y a la generación de conocimiento integral de la distribución espacial de los agregados y el espacio poroso (Felde *et al.*, 2021). En este contexto, algunos enfoques metodológicos como la micromorfología y microcartografía de suelos proveen información valiosa de la distribución espacial de los componentes del suelo, de los rasgos pedológicos y procesos tales como la traslocación de arcillas, descomposición de la materia orgánica, etc., mediante el monitoreo de muestras inalteradas a través de análisis espaciales (Torres-Guerrero *et al.*, 2020). Por lo anterior, los objetivos de la presente investigación fueron generar mapas temáticos y cuantificar los tamaños de agregados en un sistema natural, agroforestal y agrícola en Zacatlán de las Manzanas, Puebla, México, para determinar el efecto de los diferentes sistemas de producción y manejo en la agregación del suelo.

MATERIALES Y METODOS

Secciones delgadas de la colección de Génesis, Micromorfología y Clasificación de Suelos del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, fueron seleccionadas para su análisis. Estas correspondían a muestras de los primeros 10 cm de la superficie del suelo en diferentes sistemas: bosque natural (SN_BMM); tres agroforestales, uno con manejo orgánico-labranza cero (SAF_OSL), otro con manejo orgánico-labranza mínima (SAF_OLM) y manejo químico-labranza convencional (SAF_QLC); finalmente uno agrícola con manejo químico-labranza convencional (SAG_QLC). Las muestras para la elaboración de las secciones fueron obtenidas en el Municipio de Zacatlán, localizado en la región Sierra Norte del Estado de Puebla, a 12°50’06’’ y 20°08’12’’ N y 97°51’06’’ y 98°12’36’’ W. La altitud oscila de 1,120 a 2,860 msnm y el grupo de referencia dominante es Andosols. Asimismo, se obtuvo información de la densidad aparente, contenido de materia orgánica y humedad del sitio de acuerdo con lo reportado por Hernández-Ordoñez (2016). Para la elaboración de mosaicos de las secciones delgadas completas se utilizó la metodología propuesta por Gutiérrez-Castorena *et al.* (2016). Posteriormente, la imagen se separó en sus tres bandas (R, G, B) y se utilizó la banda azul para obtener una capa de agregados a través de la selección de un umbral de separabilidad (grado de brillantez = 175). Para la creación de mapas temáticos de agregados se utilizaron los criterios de tamaños propuestos por Bullock *et al.* (1985) y modificados por Gutiérrez-Castorena *et al.* (2018): Ultrafinos (< 250 µm), Muy finos (251-500 µm), Finos (501-1000 µm), Medios (1001-5000 µm) y Gruesos (> 5000 µm). Finalmente, los datos de superficie de cada tamaño de agregado en cada sistema, así como el tipo de estructura, fueron comparados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los mosaicos elaborados a partir de secciones delgadas tienen una resolución espacial de 4 μm^2, su tamaño es de 1.9 hasta 3.4 GB y están compuestos de 30 a 49 fotografías secuenciales. Asimismo, el área efectiva de cada uno es de 17.8 hasta 24.2 cm^2. Los porcentajes de superficie en las distintas clases de tamaño de agregados variaron en función de los sistemas de labranza y manejo (Cuadro 1).

La porosidad es variable, desde 40.92% en el SAG_QLC hasta 59.9% en el SN_BMM (Cuadro 1). Los poros de empaquetamiento compuesto son comunes en todas las secciones delgadas, aunque también pueden presentarse poros tipo fisura en el SN_BMM, SAF_OLM y SAG_QLC. Los sitios no presentan un tipo de agregación dominante; sin embargo, el SN_BMM tiene más del 80% de agregados subangulares, lo cual no es la típica estructura granular o migajosa de un Andosol en el horizonte A (Stoops y Sedov, 2018). Esta condición puede explicarse porque el sitio es donador por su posición en el paisaje, debido a ello, ocurren procesos de transporte de materiales. En tanto, en el SAF_OLM se presenta estructura de tipo migajosa en la superficie por la adición de material orgánico (Figura 1a) y representa el manejo más adecuado debido al aporte elevado de materia orgánica (16.3%) (Murray *et al*., 2014), lo que favorece la actividad biológica; además, mejora propiedades físicas como la densidad aparente y contenido de humedad (Cuadro 1). De manera contraria, el SAG_QLC muestra una estructura dominante de bloques subangulares (95%) y el tamaño de agregados medio comprende más del 90% del área total (Figura 1b). Asimismo, el sitio mostró el menor contenido de materia orgánica (6.3%), menor porosidad (40.92%), predominaron los agregados de tamaño medio (42.9%) y la humedad y la densidad aparente mostraron los valores más bajos. Esto se debe a la influencia de la labranza convencional, el escaso aporte de enmiendas orgánicas y la aplicación de fertilizantes químicos, lo que no favorece la formación de una buena estructura (Doret *et al.*, 2000).

Cuadro 1. Porcentajes de cada clase de tamaño de agregados y sus datos de densidad aparente, materia orgánica, humedad y porosidad.

				Tamaño de Agregados					
Sitio	**Dap**	**MO**	**Hum**	**UF**	**MF**	**F**	**M**	**G**	**Pt**
	$g \cdot cm^{-3}$	%							
SN_BMM	0.49	31.1	194.1	3.7	4.2	8.96	23.2	0	59.9
SAF_OSL	0.78	16.3	91.7	0.009	0.018	0.08	3.7	49.6	46.63
SAF_OLM	0.79	13.6	61.2	5.3	7.45	10	21.5	3	52.59
SAF_QLC	0.81	11.9	54.7	2.8	4.8	9.14	30.4	1.3	51.5
SAG_QLC	0.85	6.3	50.4	1.4	2.46	7	42.9	1.7	40.92

Dap = Densidad Aparente; MO = Materia Orgánica; Hum = Humedad; UF = Ultrafino; MF = Muy fino; F = Fino; M = Medio; G = Grueso; SN_BMM = Bosque natural; SAF_OSL = agroforestal con manejo orgánico labranza cero; SAF_OLM = agroforestal con manejo orgánico labranza mínima; SAF_QLC = agroforestal con manejo químico labranza convencional; SAG_QLC = agroforestal con agrícola manejo químico labranza convencional; Pt = porosidad total.

El SAF_OSL es opuesto al SN_BMM ya que la estructura dominante en el primer caso es de tipo granular con algunos bloques subangulares aislados. El SAF_QLC presentó homogeneidad en su estructura ya que los agregados granulares y subangulares se encuentran distribuidos aleatoriamente en toda la sección delgada. Este comportamiento indica un proceso de recuperación de la estructura debido a la disminución del impacto antrópico (Dörner *et al.*, 2009), ya que el sitio presenta un periodo de 8 años de abandono.

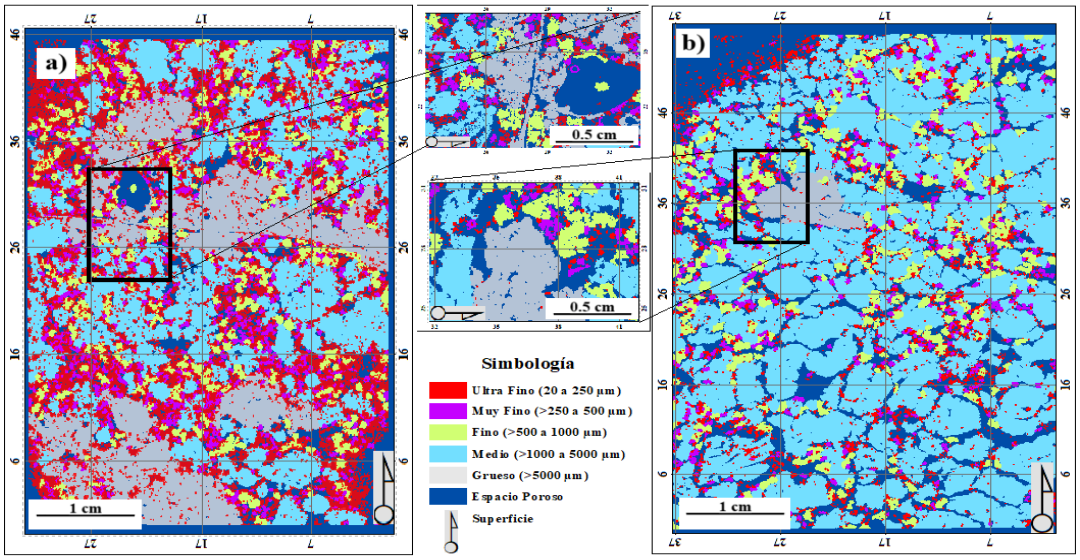


Figura 1. a) SAF_OSL. Dominan los agregados ultrafinos < 250 µm (> 50 %) y b) SAG_QLC. Dominan los agregados medios y gruesos > 1000 µm (> 90 %).

En tanto, los mosaicos son un medio efectivo para la descripción e interpretación de rasgos del suelo y complementan a los estudios convencionales, ya que esta información puede relacionarse espacialmente en áreas completas de secciones delgadas (Adderley *et al.* 2002). Además, es posible evaluar a detalle los rasgos del suelo (Stoops, 2020) y disminuir la variabilidad de las mediciones (< 5%), ya que se considera toda el área de la sección delgada (Torres-Guerrero *et al.*, 2020), a diferencia de capturar solo algunas fotografías de esta. Los mosaicos de alta resolución de secciones delgadas completas permitieron el análisis espacial en toda la sección delgada para obtener información cuantitativa de la distribución y el tamaño de agregados en suelos con diferente manejo.

CONCLUSIONES

El efecto de los diferentes sistemas (agroforestal o agrícola) y manejos (orgánicos o químicos) es evidente sobre la agregación del suelo; sin embargo, el sistema agroforestal manejo orgánico-labranza mínima mostró el mejor tipo de estructura por el incremento de la materia orgánica y la actividad biológica a diferencia de los sistemas convencionales. Los mapas temáticos de las secciones delgadas son una herramienta potencial para realizar análisis cuantitativos de procesos edáficos a partir de secciones delgadas de suelo que mantienen la estructura original.

AGRADECIMIENTOS

Al SECIHTI por la beca de ayudantía SNI I1200/051/2023. Al Dr. Carlos Alberto Ortiz Solorio, Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena y Dra. Tania González Vargas por el soporte en esta investigación. A la Biol. Jael Ponce Casañas por su apoyo incondicional.

BIBLIOGRAFÍA

Adderley, W.P., Simpson, I.A. & Davidson, D.A. (2002). Colour description and quantification in mosaic images of soil thin sections. *Geoderma,* 108(3–4), 181–195. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00123-4.

Bullock, P., Jongerius, A., Fedoroff, N., Stoops, A., Tursina, T. & Babel, U. (1985). Handbook for soil thin section description (M. del C. O.-S. C. A. Gutiérrez-Castorena, Ed.; Primera Edición). Waine Research, Mount Pleasant, Beamish Lane, Albrington, Wolverhamton, WV 73 JJ.

Dörner, J., Dec, D., Peng, X. & Horn, R. (2009). Change of shrinkage behavior of an Andisol in southern Chile: Effects of land use and wetting/drying cycles. *Soil and Tillage Research*, *106*(1), 45–53. https://doi.org/10.1016/j.still.2009.09.013.

Dorel, M., Roger-Estrade, J., Manichon, H. & Delvaux, B. (2000). Porosity and soil water properties of Caribbean volcanic ash soils. *Soil Use and Management,* 16(2), 133–140. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2000.tb00188.x.

Felde, V.J.M. N. L., Schweizer, S.A., Biesgen, D., Ulbrich, A., Uteau, D., Knief, C., Graf-Rosenfellner, M., Kögel-Knabner, I. & Peth, S. (2021). Wet sieving versus dry crushing: Soil microaggregates reveal different physical structure, bacterial diversity and organic matter composition in a clay gradient. *European Journal of Soil Science,* 72(2), 810–828. https://doi.org/10.1111/ejss.13014.

Gutiérrez-Castorena, E.V., Gutiérrez-Castorena, M.C., González Vargas, T., Cajuste-Bontemps, L., Delgadillo-Martínez, J., Suástegui-Méndez, E. & Ortiz Solorio, C.A. (2016). Micromapping of microbial hotspots and biofilms from different crops using digital image mosaics of soil thin sections. *Geoderma, 279*, 11–21. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.05.017.

Hernández-Ordoñez, J. (2016). La Calidad de los Andosoles Bajo Diferentes Sistemas de Manejo Agroforestal en Zacatlán, Puebla. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.

Murray, R.M., Orozco, M.G., Hernández, A., Lemus, C. & Nájera, O. (2014). El sistema agroforestal modifica el contenido de materia orgánica y las propiedades físicas del suelo. *Avances En Investigación Agropecuaria*, 1(18), 23–31.

Okolo, C.C., Gebresamuel, G., Zenebe, A., Haile, M. & Eze, P.N. (2020). Accumulation of organic carbon in various soil aggregate sizes under different land use systems in a semi-arid environment. *Agriculture, Ecosystems & Environment,* 297, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106924.

Stoops, G. (2020). Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. Wiley. https://doi.org/10.1002/9780891189763.

Torres-Guerrero, C. (2017). Descomposición de Raíces en Suelos Arcillosos y Diferentes Manejos Agronómicos: Análisis Multi-Escala. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo.

Torres-Guerrero, C.A., Gutiérrez-Castorena, M.C., Gutiérrez-Castorena, E.V., Ortiz-Solorio, C.A. & Herrera, J.M. (2020). Cuantificación de los componentes del suelo en secciones delgadas: Mosaicos de alta resolución versus imágenes individuales. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana,* 72(1). https://doi.org/10.18268/BSGM2020v72n1a300919.

Vogel, H., Balseiro-Romero, M., Kravchenko, A., Otten, W., Pot, V., Schlüter, S., Weller, U. & Baveye, P.C. (2022). A holistic perspective on soil architecture is needed as a key to soil functions. *European Journal of Soil Science,* 73(1). https://doi.org/10.1111/ejss.13152.

Yudina, A. & Kuzyakov, Y. (2023). Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores. *Geoderma,* 434, 116478. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116478.

EL SUELO Y SU UBICACIÓN, EN LA PRESENCIA DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES EN *Agave tequilana*

Miguel Ángel Segura Castruita[1]; Juan Florencio Gómez Leyva[1]; Saraí Monserrat Cueto Medina[1]; Pedro Yescas Coronado[1]; Mariano Ángel Valdivia Dávila[2]

[1] Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tlajomulco, km 10 Carr. Tlajomulco-San Miguel Cuyutlán, CP. 45640. Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. México.
[2] Universidad de Guadalajara/Centro Universitarios de los Altos. Av. Rafael Casillas Aceves No. 1200, Centro Universitario de los Altos, CP. 47620. Tepatitlán de Morelos, Jalisco. México.

Correo del autor de correspondencia: dmilys5@hotmail.com

RESUMEN

La naturaleza de los suelos influye en la ocurrencia de los microorganismos en el suelo. Los objetivos de esta investigación fueron clasificar científicamente suelos con plantaciones de *Agave tequilana* distribuidas en una catena, y establecer su relación con la presencia de hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Una catena en el ejido de Tequila, Jalisco, fue seleccionada, en ella se ubicaron tres sitios en un gradiente altitudinal. El estudio se distribuyó en un diseño en bloques al azar. Las posiciones altitudinales correspondieron a bloques; mientras que los tratamientos se crearon al considerar en cada sitio el factor cultivo con dos niveles (cultivado [C] y sin cultivar [n]), generando seis unidades experimentales. Los sitios y los suelos fueron caracterizados en campo y laboratorio. Muestras de los horizontes del suelo y raíces de las plantas que se encontraban en los predios seleccionados fueron llevadas al laboratorio para obtener las características físicas y químicas de los suelos con fines de clasificación, así como la presencia de HMA en las raíces de las plantas. Los resultados muestran tres grupos de referencia de suelos (Regosols, Phaeozems y Lixisols) identificados en la catena. El grado de desarrollo de los suelos tuvo relación con la ubicación de estos; es decir, los Regosols (con menos desarrollo) se encontraron en la parte alta (1,454 msnm); en la parte media (1,231 msnm), los Phaeozems con procesos de acumulación de materia orgánica en la capa superficial, y en la parte más baja (1,200 msnm) los Lixisols con procesos de eluviación-iluviación. Las características físicas y químicas de estos suelos, así como su posición altitudinal, influyeron en la presencia de arbúsculos en raíces de *Agave tequilana* y de la vegetación nativa.

PALABRAS CLAVE: *Caracterización edáfica; diversidad de suelos; micorriza; WRB.*

INTRODUCCIÓN

La naturaleza de los suelos y su clasificación es influenciada por sus características físicas, químicas o biológicas, como resultado de los procesos pedogenéticos que ocurren por la interacción constante de los factores formadores del suelo (clima, material parental, organismos, relieve y tiempo). No obstante, esta influencia no solo afecta a la propia condición edáfica, sino también a quienes dependan del suelo; por ejemplo, la composición de microorganismos de un suelo puede estar marcada por numerosos

factores (Sierra *et al*., 2022), entre los que se pueden mencionar el pH, conductividad eléctrica, el contenido y tipo de arcilla, iones intercambiables y solubles, materia orgánica, entre otros. Esto permite suponer que la diversidad microbiológica en los suelos se debe a la naturaleza de los suelos, así como también a las condiciones in situ en donde se desarrollan los microorganismos. Además de la capacidad de adaptación que tienen algunos microrganismos cuando se cambia el uso y manejo del suelo o el tipo de cultivo. No obstante, al final, la clase de suelo y sus características físicas y químicas influirán sobre la presencia de los microorganismos que en él se encuentren, sean cultivados o no.

Al respecto, los sistemas de producción agrícola han provocado cambios en el suelo con el fin de satisfacer las necesidades de la población humana. Si bien estos sistemas de producción han traído consigo el aumento del rendimiento en la mayoría de los cultivos, también han provocado la disminución de la biodiversidad microbiana del suelo, contaminación de aire y agua (Rivera *et al.,* 2020); lo que ha conducido paulatinamente a la pérdida de la fertilidad biológica de los suelos.

En los últimos años se ha implementado el uso de biofertilizantes a base de microorganismos como una alternativa para evitar el uso de fertilizantes sintéticos y pesticidas en los cultivos agrícolas; como es el caso de las bacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPR ’s) o el uso de hongos benéficos como *Trichoderma spp*. que en combinación con algunos otros microorganismos promueven el crecimiento de las plantas y le confieren protección contra las presiones ambientales como heladas, salinidad y estrés (Baez *et al*., 2017). Sin embargo, el desconocimiento de las relaciones que se pueden presentar entre los tipos de suelo y su biota, como es el caso de los HMA autóctonos, ha sido escasamente reportado y más aún cuando los suelos son de características ácidas y cultivados con *Agave tequilana*. Por lo anterior, los objetivos de este trabajo fueron clasificar científicamente suelos con plantaciones de *Agave tequilana* distribuidos en una catena, y establecer su relación con la presencia de HMA, para determinar la influencia de los suelos en la ocurrencia de este tipo de hongos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelos de tres sitios distribuidos en una ladera a diferentes altitudes fueron ubicados para su descripción y toma de muestras, en Tequila, Jalisco, México. En cada sitio, dos predios fueron seleccionados, uno cultivado con agave (3-4 años de plantado) y otro sin cultivar. En cada predio se excavó un pozo pedológico y se describieron sus horizontes. Muestras de cada horizonte (2 kg, aproximadamente) fueron obtenidas. Por otra parte, 12 agaves fueron seleccionados aleatoriamente en el predio cultivado, con el fin de extraer muestras de la capa superficial del suelo (30 cm de profundidad) a 80 cm de distancia de cada planta. El estudio se distribuyó en un diseño en bloques al azar; donde las posiciones altitudinales de los sitios correspondieron a los bloques y los tratamientos se generaron considerando el sitio por el factor cultivo con dos niveles (cultivado [C] y sin cultivar [n]); por lo que se tuvieron seis unidades experimentales, cada una con una superficie de 1 ha, aproximadamente. La parcela útil consistió en las hileras centrales con agave sin considerar 20 m de orilla de los cuatro lados. Las muestras de suelo se trasladaron al Laboratorio de Suelos y Biología Molecular del Instituto Tecnológico de Tlajomulco.

Los análisis que se realizaron fueron con fines de clasificación de suelos con base en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), entre los que se pueden mencionar, análisis mecánico de partículas, densidad aparente (Da), color, pH, conductividad eléctrica (CE), carbono orgánico (CO), materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), cationes solubles e intercambiables, contenido de P_2O_5 extraído con ácido cítrico; tanto en las muestras de los horizontes del suelo, como en las muestras de la capa superficial.Asimismo, la caracterización microbiológica se realizó por aislamiento y cultivo de microorganismos para su identificación por medio de la fenología poniendo principal atención en los HMA que se encontraban en los suelos; para lo cual, la esporulación se determinó en 100 g de suelo por conteo de espora de HMA, con el método de tamizado húmedo (Gerdemann y Nicolson, 1963). Los HMA se identificaron por comparación (Redecker *et al*., 2013) y su colonización se obtuvo por medio de la técnica de tinción diferencial con azul de tripán (Phillips *et al*., 1970); asimismo, se contabilizaron los arbúsculos. Un análisis de varianza ($\alpha = 0.05$) se llevó a cabo y se aplicó una agrupación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) en aquellos tratamientos donde existieron diferencias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos estudiados presentan horizontes de diagnóstico superficiales diferentes y con diferente desarrollo. En el primer sitio no mostraron horizontes de diagnóstico, por lo que se agruparon en Regosols, con materiales téfricos hasta una profundidad de 60 cm. Los suelos del segundo sitio presentaron un horizonte móllico y una saturación de bases mayor que 50% hasta una profundidad mayor que 60 cm, clasificándose como Phaeozems. En tanto que los suelos del tercer sitio presentan un horizonte de diagnóstico árgico y una CIC de 18 $cmol_{(+)}\ kg^{-1}$, menor que 25 $cmol_{(+)}\ kg^{-1}$, por lo que se clasificaron como Lixisols. La clasificación de los dos primeros grupos de suelo corresponde a lo que se ha reportado en la literatura (INEGI, 2025); sin embargo, llama la atención la clasificación de los suelos del sitio tres, ya que comúnmente se han reportado como Luvisoles. Esta clasificación no cumple con el criterio de la CIC (IUSS Working Group WRB, 2022), lo cual lleva a plantear que la clasificación debe revisarse en más puntos de los municipios donde se han reportado Luvisols con cultivo de *Agave tequilana*. Asimismo, deben realizarse estudios de génesis de suelos para explicar y comprender su modo de formación y comportamiento. Los Regosols se ubicaron en la parte más alta de la catena (1,454 msnm, promedio) (Cuadro 1); mientras que los Phaeozems se ubicaron en la parte media (1,231 msnm, promedio) y los Lixisols en la parte más baja (1,200 msnm, promedio). El pH de los suelos varió de ligeramente alcalino a ácido, lo cual puede tener relación con el origen del suelo y el manejo que se les ha dado (Gómez-Leyva *et al*., 2023); situación similar ocurre con la Da, la CIC y PSB, que presentaron diferencias entre los suelos estudiados.

Cuadro 1. Algunas características de los suelos de la capa superficial, con y sin cultivo de agave y la presencia de arbúsculos en las raíces de plantas.

Posición Catena	Altitud (msnm)	V†	Grupo de Suelo	Clase Textural	Da ($g\ cm^{-3}$)	pH	MO (%)	CIC ($cmol_{(+)}\ kg^{-1}$)	PSB (%)	PA
Alta (C)	1455	-	RG	Franco arenoso	1.54^{a}	4.9^{c}	2.0^{b}	16.8^{b}	78.5^{a}	4^{b}
Alta (n)	1453	Encino	RG	Franco arenoso	1.52^{a}	4.8	2.5^{a}	17.3^{ab}	77.3^{a}	8^{a}
Media (C)	1230	-	PH	Franco arcilloso	1.33^{b}	6.4^{a}	2.2^{ab}	17.9^{a}	60.4^{c}	3^{c}
Media (n)	1233	Matorral, herbáceas	PH	Franco arcilloso	1.32^{b}	5.9^{b}	2.3^{ab}	18.1^{a}	68.5^{b}	6^{a}
Baja (C)	1202	-	LX	Arcillo arenoso	1.31^{c}	5.1^{c}	1.2^{c}	15.5^{c}	45.8^{f}	-
Baja (n)	1199	herbáceas	LX	Arcillo arenoso	1.30^{c}	5.2^{c}	1.7^{bc}	16.7^{b}	49.6^{d}	4^{b}

V† = vegetación; Da = densidad aparente; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; PSB = porcentaje de saturación de bases; PA = presencia de arbúsculos en las raíces; C = con cultivo; n = sin cultivo. Grupos de Suelo: RG = Regosols; PH = Phaeozems; LX = Lixisols. Letras distintas en una misma columna reflejan diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

Un aspecto importante de resaltar es el manejo que recibían los suelos con plantaciones de agave en cada sitio. En los Regosols no se utiliza maquinaria pesada para la preparación del terreno; mientras que el uso de agroquímicos (urea y herbicidas) y biofertilizantes a base de ácidos húmicos, es mínimo durante el ciclo vegetativo. En los Phaeozems se utiliza maquinaria pesada para la preparación del suelo, se fertiliza con triple 17, además de enmiendas orgánicas, ácidos húmicos y fúlvicos, y herbicidas. Finalmente, en los Lixisols, la producción es intensiva, ya que todo se realiza de manera mecanizada, a excepción de la plantación; el cultivo es fertilizado con urea, triple 17, ácidos húmicos y fúlvicos, herbicidas y fungicidas.

Los suelos sin cultivo presentaron vegetación de encino en los Regosols, matorrales y herbáceas en los Phaeozems y solo herbáceas en los Lixisols. En cuanto al efecto de la altitud en la presencia de HMA en los cultivos de agave, fue diferente, lo cual puede estar relacionado con el tipo de vegetación que existía en esos suelos, como lo explicaron Gómez-Leyva *et al*. (2023). Por otra parte, aun cuando no se tienen evidencias de las especies de HMA autóctonas, la cantidad de arbúsculos fue diferente en el mismo suelo dependiendo de si estaba cultivado o no (Cuadro 1). Los Regosols y los Phaeozems presentaron más arbúsculos en ambas condiciones, en comparación con los Lixisols, donde solo se encontraron cuatro arbúsculos en la vegetación nativa. En cambio, los Regosols presentaron cuatro y ocho arbúsculos (en raíces de agave y vegetación nativa, respectivamente), observándose una tendencia en función de la clase de suelo. Lo anterior permite suponer que el número de especies de HMA será distinto en función de cada

clase de suelo, su ubicación altitudinal y su manejo; sin embargo, esto podrá esclarecerse una vez que se relacionen las especies presentes en los suelos, su colonización y grado de esporulación, con las características y manejo de los suelos.

CONCLUSIONES

Las clases de suelo en el ejido Tequila, Jalisco, influyen en la presencia de hongos micorrízicos arbusculares, ya que se detectaron arbúsculos en raíces de *Agave tequilana* y vegetación nativa. En las raíces de agave y vegetación natural que se encontraban en los Regosols y Phaeozmes presentaron más arbsúculos que los Lixisols. Por otra parte, el grado de desarrollo de las clases de suelo se relacionó con la altitud en la catena, donde los Regosols (menor desarrollo) se encontraron en la parte alta, los Phaeozems en la parte media y los Lixisols en la parte baja. Asimismo, el manejo de los suelos podría influir en la formación de arbúsculos en las raíces de *A. tequilana*. No obstante, es indispensable continuar con la investigación para definir el comportamiento de los hongos micorrízicos autóctonos en suelos cultivados con *Agave tequilana*.

BIBLIOGRAFÍA

Baez, R.A., Morales-García, Y.E., Quintero-Hernández, V. & Muñoz-Rojas, J. (2017). Generation of microbial inoculants for agriculture and bioremediation. *Microb Biotechnol,* 10(1):19-21. Doi: http://doi.org/10.1111/1751- 7915.12448

Gerdemann, J.W. & Nicolson, T.H. (1963). Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Transactions of the British Mycological Society*, 1963, 46, 2, 235-244.

Gómez-Leyva, J.F., Segura-Castruita, M.A., Hernández-Cuevas, L.V. & Íñiguez-Rivas, M. (2023). Arbuscular Mycorrhizal Fungi Associated with Maize (*Zea mays* L.) in the Formation and Stability of Aggregates in Two Types of Soil. *Microorganisms*, 11(11), 2615. https://doi.org/10.3390/microorganisms11112615.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2019). Sistema de descarga de productos digitales. http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/edafológico/2019 (Consulta: 05 agosto 2025).

IUSS Working Group WRB. (2022). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. 4a edición. Unión Internacional de las Ciencias del Suelo (IUSS), Viena, Austria.

Phillips, J.M. & Hayman, D.S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55, 1, 158-IN18.

Redecker, D., Schüβler, A., Stockinger, H., Stürmer, S., Morton, J.B. & Walker C. (2013). An evidence-based consensus for the classification or arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota). *Mycorrhiza*, 23, 515-531. http://doi.org/10.1007/s00572-013-0486-y.

Rivera, U.A., Vázquez-Sandoval, D., Fernández-Vázquez, J., Rosete-Enríquez, M., Cesa-Luna, C., Morales-García, Y.E., Muñoz-Rojas, J. & Quintero-Hernández V. (2020). Aportes y dificultades de la metagenómica de suelos y su impacto en la agricultura. *Acta Biol Colomb.,* 449- 461. https://doi.org/10.15446/abc.v26n3.85760

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana que establece las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreos y Análisis (NOM-021-RECNAT-2000). Diario Oficial de la Federación 31 de diciembre 2002. México, DF. 85 p.

Sierra, M.J., García-Montero, R., Rodriguez-Rastrero, M. & Millan R. (2022). Comparación de microbiomas de suelos calcáreos y yesosos en parcelas de secano bajo clima Mediterráneo. *Revista de Ciencias Agrarias,* 45(4): 230-233. https://doi.org/10.19084/rca.28411.

CARTOGRÁFIA Y ANÁLISIS DE CAMBIO DEL USO DE SUELO CON SERIES TEMPORALES EN SAN FELIPE DEL PROGRESO, MÉXICO

Luis Ángel Cruz González[1]; Enrique Ojeda Trejo[1]; Gerardo Sergio Benedicto Valdez[1]; Vicente Espinoza Hernández[1]; Rocío Albino Garduño[3]; Julio César Buendía Espinosa[2]

[1] Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo (CP-CM), Postgrado en Edafología, Montecillo, Texcoco, CP. 56240. Estado de México, México.
[2] Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible-Departamento de Suelos-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera Texcoco-México km 38.5, CP. 56230. Texcoco, Estado de México. México
[3] Universidad Intercultural del Estado de México. Libramiento Francisco Villa S.N. C.P. 50640. San Felipe del Progreso, Estado de México, México.

Correo del autor de correspondencia: cruz.luisangel@colpos.mx

RESUMEN

La cartografía y el análisis del cambio de uso de suelo y vegetación de San Felipe del Progreso, México, se llevaron a cabo con análisis temporales del estiaje con el uso del NDVI en el periodo de tiempo 2015-2025. Filtros Savitzky–Golay optimizados (FSGO) (orden 2, ventana 3) fueron aplicados mediante validación cruzada (RMSE = 0.0234), y se realizaron análisis no paramétricos multitemporales utilizando la pendiente de Theil–Sen (PTS), la estadística Z de Mann–Kendall (ZMK), así como el índice de Hurst (EH), sobre datos mensuales de diciembre–enero, con énfasis en persistencia temporal. La interpretación de los resultados se realizó con un sistema de categorización compuesto de cinco rangos de tendencia, significancia y persistencia, para distinguir patrones de reverdecimiento, estabilidad o degradación por clase de cobertura. Los resultados revelaron reverdecimiento persistente en bosques de coníferas y vegetación secundaria (Sg > 70%); mientras que los cuerpos de agua presentaron pardeamiento sostenido (Sb > 62 %). El mapa ZMK mostró áreas con cambio, complementando el diagnóstico con mapas de EH, p-valor y PTS. El análisis zonal evidenció inconsistencias en la cartografía oficial 2017–2021 de INEGI, las cuales fueron corregidas mediante indicadores NDVI robustos. Se plantea la incorporación de índices espectrales acuáticos (como NDWI) para mejorar el monitoreo de cuerpos de agua en futuras etapas. En conjunto, el enfoque aplicado proporciona insumos cuantitativos para fortalecer la cartografía temática de uso de suelo, mejorando la diferenciación ecológica mediante métricas validadas estadísticamente.

PALABRAS CLAVE: *Análisis tendencias; clases de vegetación*; *exponente de hurst*; *NDVI; teledetección*.

INTRODUCCIÓN

El diagnóstico y monitoreo de los cambios en la vegetación son esenciales para la gestión ambiental y el monitoreo de las diferentes clases de cobertura terrestre. Las actividades antrópicas ocasionan fluctuaciones del tipo de cobertura y su extensión a

través del tiempo, disminuyendo o aumentando su extensión. Esta situación se agrava por la desactualización de la cartografía oficial de uso de suelo y vegetación, ya que queda obsoleta ante la rápida dinámica de cambio (Bocco *et al*., 2001). Ante este problema, una alternativa para cuantificar los cambios temporales y espaciales de biomasa y la cobertura vegetal es el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) (Pettorelli *et al*., 2005). Por otra parte, la complejidad de la velocidad de los procesos ecológicos y la persistencia o reversibilidad de los cambios pueden estimarse con análisis de series de tiempo.

Ante el constante cambio de uso de suelo para el incremento de área agrícolas y las modificaciones en las zonas de vegetación natural en la región Mazahua de México, donde se encuentra el municipio de San Felipe del Progreso (INEGI, 2017), cuyas características orográficas son peculiares, es necesario el desarrollo de métodos que permitan discriminar y monitorear los cambios en cada tipo de vegetación en este municipio, información que la cartografía oficial actual no indica. Por lo cual, los objetivos de este trabajo fueron: 1) Identificar y cuantificar cambios recientes de la vegetación mediante análisis de tendencias no paramétricos; 2) Evaluar el grado de persistencia temporal por clase de uso de suelo; y 3) Aplicar los productos generados para optimizar la interpretación y actualización de las clases de uso de suelo y vegetación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El municipio de San Felipe del Progreso ocupa un área de 368.15 km², en la porción noroccidental del Estado de México (19°30'–19°47'N y 99°51'–100°06'W). La región tiene altitudes que varían de 2,200 hasta los 3,400 msnm (INEGI, 2017).

Materiales y equipos. Imágenes de satélite Sentinel-2 y Landsat 8 (Google Earth Engine) para el período 2015-2025 del área de estudio fueron utilizadas. Estas imágenes se armonizaron para homogeneizar la resolución a 10 m; con una resolución temporal de 5 y 16 días, respectivamente. Asimismo, la cartografía digital de Uso de Suelo y Vegetación escala 1:250,00 (INEGI, 2017) fue utilizada. El procesamiento se realizó con software R versión 4.3.0.

Validación y ajuste de linderos de la capa Uso de Suelo y Vegetación. Las estadísticas zonales para cada polígono de la capa de uso de suelo y vegetación fueron extraídas. Asimismo, los números digitales de los NDVI de las series, obtenidos de las imágenes de satélite como se indica en el siguiente apartado, fueron extraídos con los polígonos de usos de suelo y vegetación, para lo que se tuvo la precaución de identificar límites de polígonos mal clasificados considerando únicamente los píxeles completamente contenidos dentro de cada polígono para evitar efectos de borde.

Análisis estadístico. Preprocesamiento de imágenes satelitales y construcción de series temporales, se realizó desde la plataforma Google earth Engine que consistió en: 1) Cálculo de NDVI mediante la ecuación estándar: NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) (Rouse *et al*., 1974); 2) Generación de dos stacks de imágenes extraídas para su posterior procesamiento en el paquete estadístico R. El primero con composición mensual a partir la mediana de los valores por píxel por mes, para reducir efectos atmosféricos residuales (Holben, 1986); El segunda, serie anual promedio de las medias mensuales de diciembre

y enero. Para ambas series se tomaron los años 2015-2025, enfocándose en la temporada de estiaje (diciembre-enero) para minimizar la influencia de la variabilidad estacional y evaluar la respuesta de la vegetación al estrés hídrico (Huete *et al*., 2002); utilizando medidas de tendencia central robustas, específicamente la mediana, en los indicadores NDVI multitemporales para su construcción. El filtro optimizado se aplicó para suavizar las series temporales, a nivel de píxel, y reducir el ruido atmosférico (Savitzky y Golay, 1964). La PMK corregida por empates fue empleada para detectar tendencias monotónicas significativas (Kendall, 1975). La PTS se obtuvo mediante el estimador de Sen (1968). El estadístico Z se estimó considerando la corrección por empates. Además, el índice de Hurst (EH) se calculó con las series mensuales de diciembre-abril del NDVI con el fin de incrementar el número de observaciones temporales (Hurst, 1951). Cabe señalar que todas las pruebas se llevaron a cabo a nivel de píxel. Por otra parte, un mapa de estabilidad-cambo de los usos del suelo se obtuvo al integrar el EH, la PTS y la significancia estadística de la PMK (Zhou *et al*., 2014). Finalmente, la capa de uso de suelo y vegetación fue actualizada al reclasificar los mapas con los valores de los píxeles de detección de zona de cambio y se corrigieron los linderos mediante análisis de coherencia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de las combinaciones de parámetros mostró que p = 2 y n = 3 fueron los óptimos, ya que resulta la menor RMSE (0.0234); lo que sugiere que filtros de orden cuadrático con ventanas pequeñas son efectivos para series temporales cortas de NDVI. Al respecto, Chen *et al*. (2004) indicaron que, este tipo de modelo es el mejor para filtrar ruido en fenómenos ambientales.

Las clases con vegetación forestal (bosque, vegetación secundaria arbórea y arbustiva) mostraron pendientes positivas (PTS > 0.043); además, los valores de EH fueron mayores que 0.789, con una ZMK mayor que 2.33 y un valor de p menor que 0.02. Lo anterior sugiere un incremento en el valor del NDVI a través del tiempo, lo que implica un reverdecimiento y fenómenos transicionales ecológicos (Vallejos-Burgos *et al*., 2023; González-Zelaya *et al*., 2022). En cambio, la clase Agua, mostró una pendiente negativa (–0.0431), con una Z negativa (–2.18) y p menor que 0.02, lo que indica cambios en la reflectancia por la disminución del volumen de agua, relacionado con el estrés hidrológico regional (Mendoza-González *et al*., 2023). No obstante, el índice NDVI no es un indicador para el monitoreo de cuerpos de agua (Cuadro 1), por lo cual es recomendable la utilización del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) para este tipo de análisis.

El análisis reveló patrones diferenciables entre los usos de suelo y vegetación; las zonas con bosques de coníferas mostraron la mayor proporción de tendencias positivas dentro de su clase, con PTS < 0.02 año^{-1}, siendo las áreas con mayores pendientes, siguiendo las curvas de nivel que se observan en la Figura 1.

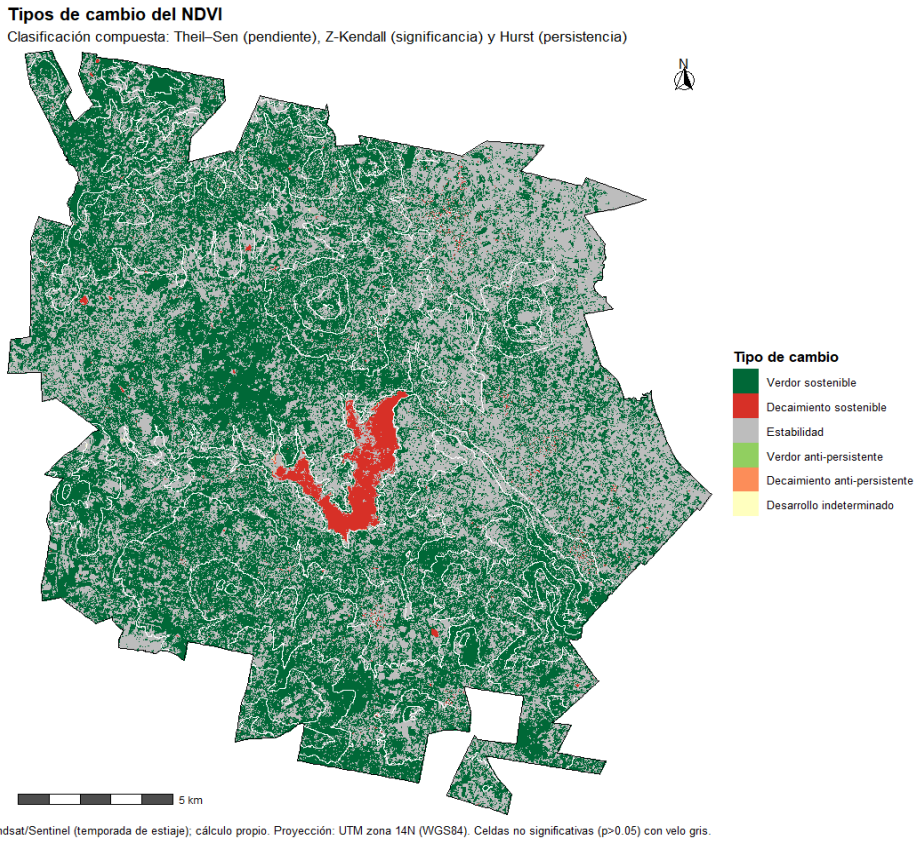


Figura 1. Mapa de categorización compuesta NDVI-Hurst-Sen (2015–2025).

Cuadro 1. Estadísticos multitemporales del NDVI por clase de uso de suelo y vegetación (2015–2025)

USV	CV	EH	PTS	ZKM	P
Agricultura	4.434	0.722	0.012	2.024	*
Agua	4.277	0.780	-0.043	-2.180	*
Bosque Coníferas	4.298	0.793	0.049	2.335	*
Bosque Oyamel	4.982	0.791	0.041	1.868	-
Pastizal	4.322	0.734	0.014	2.024	*
Urbano	4.796	0.722	0.009	1.713	-
V.S. Arborea	4.315	0.789	0.044	2.335	*
V.S. Arbustiva	4.227	0.790	0.046	2.335	*

† USV = uso de suelo y vegetación; CV = cobertura vegetal**;** EH = índice de Hurst; PTS = Pendiente de Theil-Sen; ZKM = estadístico Z de Mann-Kendall; p = probabilidad de rechazo; V.S. = Vegetación Secundaria; * = significativo ($p < 0.05$); - = no significativo.

La aplicación del sistema de categorización permitió identificar seis patrones principales de dinámica vegetal. Las áreas clasificadas como "persistente fuerte con tendencia positiva" se concentraron en bosques maduros de coníferas, representando más del 73% de su categoría, lo que sugiere alta resiliencia ante perturbaciones menores y capacidad de mantener su estructura y función a largo plazo. Las zonas "anti-persistentes con tendencia negativa" se localizaron principalmente en áreas definidas como agua (> 62% del área) (Figura 1).

CONCLUSIONES

El análisis multitemporal y estadístico del NDVI (2015–2025) permitió identificar patrones diferenciados en la dinámica vegetal de San Felipe del Progreso. Se detectaron tendencias positivas y persistentes en coberturas forestales, como bosques de coníferas y vegetación secundaria, indicando procesos de reverdecimiento y estabilidad ecológica durante el estiaje. La combinación de filtros Savitzky–Golay, análisis de tendencia y persistencia, junto con un sistema de categorización multivariable, ofreció una caracterización espacial detallada robusta de la dinámica del uso del suelo; por lo que este enfoque es clave para fortalecer el ordenamiento ecológico, la gestión territorial y servir como base para políticas públicas orientadas a la sostenibilidad ambiental. No obstante, es importante la validación en campo de los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

Chen, J., Jönsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsushita, B. & Eklundh, L. (2004). A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment,* 91, 332-344.

Holben, B.N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. International *Journal of Remote Sensing*, 7, 1417-1434.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X. & Ferreira, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment,* 83, 195-213.

Hurst, H.E. (1951). Long-term storage capacity of reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers,* 116, 770-799.

INEGI (2017). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250,000. Serie VI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.

Kendall, M.G. (1975). Rank correlation methods. Charles Griffin, London, UK.

Mandelbrot, B.B. & Wallis, J.R. (1969). Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long run statistical dependence. *Water Resources Research,* 5, 967-988.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium,* 1, 309-317.

Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association,* 63, 1379-1389.

CAPACITACIÓN EN MAPEO DIGITAL DE SUELOS PARA COMUNIDADES PROFESIONALES EN AMÉRICA LATINA: CERRANDO BRECHAS LINGÜÍSTICAS Y DE APRENDIZAJE

Mario Antonio Guevara Santamaria[1]; Carlos Eduardo Arroyo Cruz[1]; Viviana Marcela Varón Ramírez[1]; K. Julieta Blancas Zamora[1]

[1] Instituto de Geociencias, UNAM, Blvd. Juriquilla 3001, Juriquilla, Querétaro, México.

Correo del autor de correspondencia: mguevara@geociencias.unam.mx

RESUMEN

El mapeo digital de suelos (MDS) ha experimentado un creciente interés en disciplinas, como la agricultura, la conservación del medio ambiente y la investigación. Con el objetivo de institucionalizar y avanzar en la investigación del MDS en México y países de América del Sur, en 2020, se creó el primer grupo de trabajo universitario en MDS por el Instituto de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). En 2023, el grupo desarrolló e implementó el primer Curso de Capacitación en el Mapeo Digital de Suelos en México dirigido a comunidades de habla hispana, avalado por la Red de Educación Continua de la UNAM. El programa está diseñado como un curso técnico integral, estructurado en módulos que combinan aspectos teóricos, prácticos y aplicados de la pedometría. Su objetivo es dotar a los participantes de conocimientos y herramientas esenciales para hacer operativos los sistemas de inferencia espacial para la cartografía digital de suelos. Hasta 2024, el programa ha formado dos generaciones, con un total de 126 participantes de 12 países diferentes, los cuales han generado 25 informes de proyectos aplicados. Estos resultados ponen en evidencia el impacto y alcance internacional de esta iniciativa, principalmente en comunidades de habla hispana. Con este trabajo, buscamos impulsar el desarrollo de soluciones técnicas y prácticas del MDS, convocando a la colaboración interdisciplinaria y a la integración de herramientas de percepción remota e IA. Proyectamos próximos resultados significativos, en donde se logre consolidar al CC-MDS, como una formación hispana y especializada de referencia internacional.

PALABRAS CLAVE: *Clasificación digital de los suelos; geoestadística; pedometría; variabilidad espacio-temporal del suelo.*

INTRODUCCIÓN

El mapeo digital de suelos (MDS) también conocido como mapeo pedometríco, es una disciplina emergente en las ciencias del suelo que estudia la variabilidad espacio-temporal de las propiedades y funciones del suelo a través de la aplicación de métodos matemáticos y estadísticos (Wadoux *et al.*, 2021; Lagacherie y McBratney, 2006). A diferencia de la cartografía convencional del suelo (basada principalmente en el conocimiento tácito de la variación del suelo), el MDS se basa en tecnologías y disciplinas emergentes como la teledetección, las ciencias de la información geográfica (SIG), el

aprendizaje automático y la inteligencia artificial, las ciencias informáticas y de datos, así como las técnicas de modelización espacial. La integración de la tecnología y otras disciplinas permite reducir el tiempo y el coste económico de la cartografía del suelo, también facilita la escalabilidad de las propiedades del suelo y las estimaciones de sus clases (Minasny y McBratney, 2016).

Según Wadoux *et al*. (2021), existen 10 retos principales para la MDS que implican principalmente cuestiones relacionadas con la investigación; sin embargo, la dimensión formativa del problema queda al margen. Para alcanzar los objetivos de la DMS es esencial aumentar el número de grupos de trabajo sobre dicho tema en todo el mundo.

El propósito del programa de capacitación es acercar a los participantes al estado del arte en el mapeo digital de suelos y la pedometría, compartiendo elementos teóricos y prácticos para el mapeo digital de suelos en México y el mundo.En este trabajo, el objetivo es difundir el impacto que ha tenido el programa de capacitación e invitar a nuevos profesionistas para que se interesen en crear bases sólidas en el MDS y lograr su interés en el desarrollo de nuevos problemas de investigación dentro del área.

MATERIALES Y MÉTODOS

El programa se divide en cuatro módulos principales, con una duración total de 32 horas, los cuales son: Introducción al MDS, gestión de datos y armonización de datos, análisis de datos y modelización e interpretación y comunicación de resultados. Se presenta una breve descripción de cada módulo:

1. Introducción al MDS. El primer módulo introduce a los participantes en los fundamentos teóricos e históricos de la cartografía digital de suelos. Los temas incluyen la variabilidad espacial del suelo, la cartografía convencional del suelo y el marco conceptual del MDS. Los participantes también explorarán las principales fuentes de información sobre el suelo.

2. Armonización de fuentes de información. El segundo módulo se centra en las técnicas de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para gestionar y armonizar bases de datos medioambientales y de suelos a gran escala. Los temas abarcan la teledetección, el análisis morfométrico, la integración de datos climáticos y la preparación de matrices de regresión y clasificación. Los participantes aprenderán a organizar e integrar covariables medioambientales fundamentales para el MDS.

3. Análisis de datos y modelización. Este módulo proporciona herramientas de libre acceso para el análisis de datos y la elaboración de modelos predictivos. Los participantes realizarán análisis exploratorios de datos, seleccionarán variables y modelos, y aprenderán técnicas para la evaluación de modelos y la estimación de la incertidumbre. Los temas clave incluyen el análisis de correlación, los conjuntos de modelos y las pruebas de sensibilidad.

4. Interpretación y comunicación de resultados. Los participantes en este módulo desarrollarán habilidades para interpretar mapas digitales de suelos, generar informes y comunicar resultados de manera efectiva. El módulo hace hincapié en la documentación de metadatos, la notificación de errores y la redacción científica.

Así mismo se adiciona un taller de evaluación y ponencia de casos de estudio aplicados, para que el participante logre formalizar lo aprendido con las últimas dos sesiones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hasta diciembre de 2024, el programa de capacitación en MDS ha tenido dos generaciones, 2023 y 2024, con un total de 126 participantes de 12 países diferentes. México lideró la participación con 75 participantes seguido de Colombia con 13, Uruguay con 8 y Perú con 7. La participación femenina en la primera generación fue del 30% con un aumento del 5% para la segunda entrega del curso. Una participación global por sexo mostró que el 36.5% de los asistentes son mujeres y el 63.5% hombres (Figura 1). En cuanto a la ocupación, los datos muestran un predominio de participantes procedentes del sector público y de diferentes instituciones educativas (estudiantes), y el 69% de los participantes declararon tener experiencia previa en MDS. La mayoría de los participantes son licenciados (o equivalentes, 50%), seguidos de estudiantes de maestría (38%) y doctorado (6%); el resto del porcentaje son profesionales o de niveles educativos inferiores.

Hemos animado a todos los participantes a preparar una breve comunicación sobre sus proyectos, por lo que se generaron 25 informes. En la Figura 2, presentamos fichas de los temas más comunes de todos los proyectos finales desarrollados por los estudiantes. En este caso, la variabilidad espacial del carbono orgánico del suelo es el tema más común de la cartografía y modelización digital. El material utilizado durante las sesiones de formación 2024, junto con el vídeo de todas las sesiones, se publicó en la plataforma Zenodo (Arroyo-Cruz *et al.*, 2024).

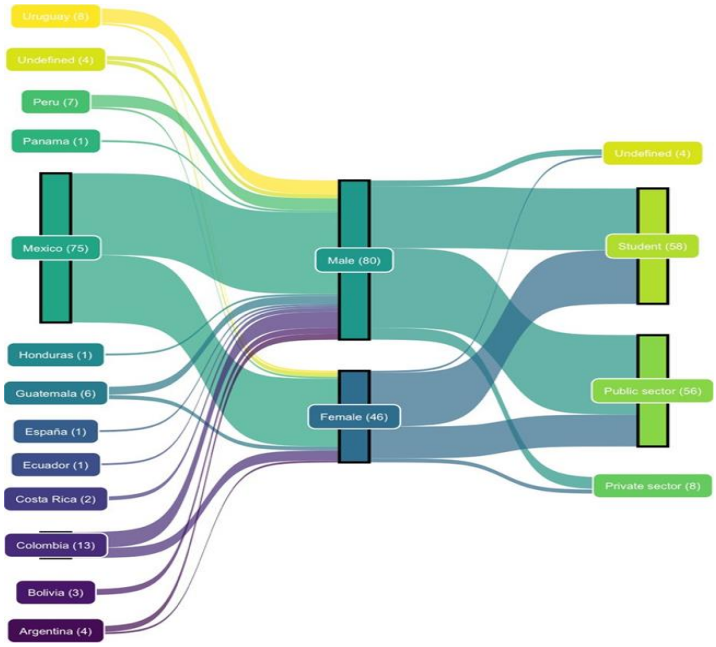


Figura 1. Gráfico aluvial mostrando relaciones demográficas entre los beneficiarios del programa.



Figura 2. Gráfico de nube de palabras, mostrando las principales palabras clave de interés para los y las participantes, relacionadas directamente con el MDS.

CONCLUSIONES

Existe un creciente interés por desarrollar y utilizar productos derivados del MDS para informar decisiones sobre la gestión del suelo. Aquí, presentamos el plan de estudios implementado para una formación sobre esta área en español, especialmente teniendo en cuenta que la formación sobre la misma se ha realizado en inglés mediante conferencias de la Universidad o cursos privados. Esperamos que la siguiente serie aumente la participación de miembros de países de América Latina con menor representación, principalmente en respuesta al hecho de que la mayoría de los participantes de esta capacitación fueron de México. Por último, cabe destacar que el porcentaje de mujeres que participaron en la formación fue bajo, lo que pone de manifiesto la necesidad de mejorar su participación en este ámbito, tal y como se ha puesto de manifiesto en estudios anteriores (Hernández, 2023).

BIBLIOGRAFÍA

Arroyo-Cruz, C.E., Varón-Ramírez, V.M., Sánchez-Rojas, M.A. & Guevara-Santamaría, M.A. (2024). I Curso Capacitación en Mapeo Digital de Suelos en idioma español. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.13963408.

Hernández, J., Rodríguez-Bustos, L., Barreras, A., Caballero, L., Lara, I., Guevara, M., Lopera, A., Vázquez-Lule, A., Torres-Gómez, M. & Prado, B. (2023). Women representation in soil science: gender indicators in the University Program of Interdisciplinary Soil Studies. *Frontiers in Soil Science,* 3. https://doi.org/10.3389/fsoil.2023.1194828.

Minasny, B. & McBratney, A.B. (2016). Cartografía digital del suelo: Una breve historia y algunas lecciones. *Geoderma,* 264, 301-311. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.017.

Lagacherie, P. & Mcbratney, A.B. (2006). Chapter 1 Spatial Soil Information Systems and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping. *Developments in Soil Science,* 31. 3-22. 10.1016/S0166-2481 (06)31001-X.

Wadoux, A.M.J.-C., Heuvelink, G.B.M., Lark, R.M., Lagacherie, P., Bouma, J., Mulder, V.L., Libohova, Z., Yang, L. & McBratney, A.B. (2021). Ten challenges for the future of pedometrics. *Geoderma,* 401, 115155.

DETERMINACIÓN DE LA CONSISTENCIA DEL SUELO MEDIANTE UN MÓDULO DE COMPRESIÓN DIGITAL: UNA ALTERNATIVA

Diego Emilio Pérez Martínez[1]; Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena[1]; Anahí Del Carmen Esquivias Fierro[1]; Vicente Vidal Encinia Uribe[1]; María Fernanda García Montemayor[1]; Rocío Citlali Gutiérrez de la Garza[2]

[1] Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, CP. 66050, General Escobedo, Nuevo León, México.
[2] Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, CP. 04510, Del. Coyoacán, CDMX, México.

Correo del autor de correspondencia: edgar.gutierrezcs@uanl.edu.mx

RESUMEN

Las metodologías descriptivas de los perfiles edafológicos se desarrollaron para extraer información de los horizontes previamente designados con propiedades cualitativas y cuantitativas; sin embargo, la discrepancia en la caracterización de propiedades como la consistencia ha impulsado el desarrollo de técnicas más precisas y replicables. Para ello, se desarrolló un sistema de clasificación que complementa la interpretación cualitativa con un rango de fuerzas de compresión (N), mediante un módulo que ejerce presión constante hasta provocar la ruptura del agregado, por lo que el objetivo del estudio fue determinar la consistencia de agregados en suelo cultivado a través de ensayos de resistencia a la compresión (RC), relacionando los valores obtenidos con los sistemas de caracterización tradicional. Se asignaron tres puntos de muestreo en camas de siembra y se procuró la obtención de agregados del epipedón de un decímetro cúbico para la subdivisión manual en agregados de cinco centímetros cúbicos (cc), aproximadamente. Los resultados obtenidos en el análisis químico revelaron un alto contenido de $CaCO_3$ y moderadamente alto de materia orgánica (MO), mientras que los resultados de los ensayos de RC registraron altas fluctuaciones, lo cual se explicó a través de un análisis de regresión lineal múltiple por la relación entre el calcio y el diámetro de los agregados. El módulo de compresión digital es una propuesta adecuada para la cuantificación de la consistencia en seco; sin embargo, los valores promedio de fuerzas aplicadas a cada repetición no presentaron similitud a los indicados por la Soil Survey Staff en su sistema de clasificación de consistencia.

PALABRAS CLAVE: *Agregación natural del suelo; Agricultura protegida; Epipedón; Perfiles edafológicos; Resistencia a la compresión.*

INTRODUCCIÓN

La descripción de perfiles de suelo es una metodología establecida hace más de 15 décadas (Tandarich *et al*., 2002), con el objetivo de conocer la morfología de las diversas capas de suelo, su formación y las particularidades (procesos y propiedades) de los epipedones y endopedones (Churchward, 1961). Los investigadores del recurso suelo propusieron delimitar los horizontes mediante la descripción cuantitativa y cualitativa

de propiedades químicas, físicas, mineralógicas y biológicas a partir de un perfil edafológico, donde las propiedades observadas en cada horizonte corresponden a características particulares propias de cada sitio.

Con el paso del tiempo y el avance tecnológico, es más frecuente visualizar equipos que auxilien en la identificación y cuantificación de las propiedades de los horizontes, ya que la designación y ubicación de estos llegan a ser subjetivas (Weindorf *et al.*, 2012; Arnold y Eswaran, 1993; Schelling, 1970). En ese sentido, es prioritario homogenizar el conocimiento entre técnicos e investigadores de todo el mundo, con el objetivo de crear bases de datos con criterios y características de propiedades cuantitativas definidas. Sin embargo, existen algunas propiedades que, únicamente con su descripción cualitativa, resultan suficientes para la identificación del proceso pedogenético presente en el horizonte superficial o subsuperficial, como lo son el tipo y desarrollo de la estructura y la presencia o ausencia de procesos redoximórficos. No obstante, hay otros procesos que requieren de la identificación y cuantificación en campo por horizonte, como lo son el tipo, diámetro, profundidad y frecuencia de raíces, poros y agregados.

En este contexto, la caracterización de la consistencia en seco, húmedo o saturado, presenta una alta discrepancia debido a las fuerzas ejercidas de compresión o elasticidad necesarias para ocasionar la ruptura de los agregados, la cual está en función del contenido de humedad presente (Ortiz-Solorio, 2019). Inicialmente, Cuanalo (1990) propuso seis categorías cualitativas para determinar la consistencia en seco y, posteriormente, la Soil Survey Staff (2024) desarrolló un sistema de clasificación con nueve categorías y valores cuantitativos para cada clase.

El objetivo del estudio fue determinar cuantitativamente la consistencia de agregados del epipedón de un sistema productivo intensivo en un invernadero mediante un módulo de ruptura digital, comprobando el sistema de clasificación de consistencia en seco propuesto por la Soil Survey Staff.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, localizada en el municipio de General Escobedo, Nuevo León, en las coordenadas 25°47’6.79” N y 100°17’12.5” W, a una altitud de 504 msnm. La temperatura media fluctúa entre los 29.5 °C y 17.3 °C, y la precipitación anual promedio registrada es de 422.8 mm.

Los puntos de muestreo fueron distribuidos aleatoriamente en camas de siembra, dentro de un invernadero tipo Israelita, bajo labranza semiconvencional con subsolado, arado y rastrillado cada tres ciclos agrícolas, y labranza con rotocultivadora (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2025). Las muestras (M1, M2 y M3) se recolectaron del epipedón de un Antrosol en forma de agregados con un volumen aproximado de un decímetro cúbico, los cuales se subdividieron cuidadosamente en agregados de cinco cc con un diámetro fluctuante entre 20 y 35 mm. Posteriormente, los agregados se dejaron reposar durante 48 h para la homogeneización de humedad y secado en una estufa a 60 °C por 14 h.

Los agregados fueron pesados y medidos individualmente, realizando una repetición para la interpretación cualitativa de la consistencia en seco y tres repeticiones por muestra con el módulo de compresión (A1, A2 y A3). Este último, consta de un dinamómetro digital con un cabezal de 1.5 cm^2, instalado sobre una base cuyo desplazamiento vertical se encuentra controlado por un motor. Los agregados se colocan encima de una placa metálica y el dinamómetro toma la lectura de la unidad de fuerza necesaria hasta ocasionar su ruptura (Figura 1).

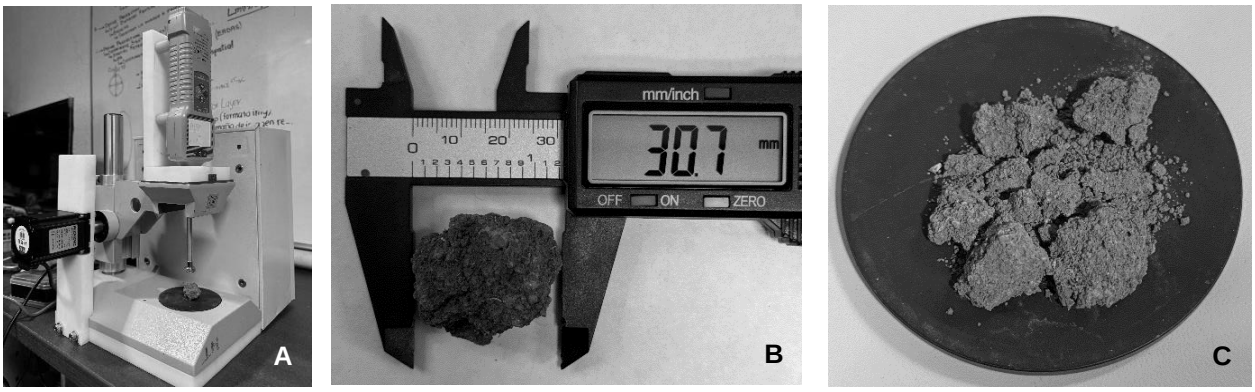


Figura 1. Metodología para la determinación de la consistencia: A, módulo de compresión digital; B, medición de diámetro de agregado; y C, fractura de agregado post-ensayo.

Las muestras de suelo se analizaron químicamente (Cuadro 1) siguiendo las técnicas del manual de procedimientos de Van Reeuwijk (2002) y se correlacionaron las variables físicas y químicas con las fuerzas de compresión de cada agregado mediante un análisis de regresión lineal múltiple tipo Stepwise, realizado con el paquete estadístico SPSS 14.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características químicas de los suelos muestran los contenidos de Ca y $CaCO_3$, son altos (Cuadro 1), lo cual es común en regiones con climas secos semiáridos, donde se precipita $CaCO_3$ en la solución del suelo (Ju *et al.*, 2017; Pal *et al.*, 2000).

Cuadro 1. Análisis químico de las muestras de suelo en invernadero.

Muestra	pH	CE	MO	$CaCO_3$	CIC	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	P
		(dS m^{-1})	- - (%) - -		- - - - ($cmol_{(+)}$ kg^{-1}) - - -				(mg kg^{-1})
M1	7.52	2.87	2.70	35.80	15.90	1.25	26.55	19.14	29.50
M2	7.30	2.92	2.70	32.00	13.70	1.14	34.15	15.10	31.30
M3	7.85	2.43	3.47	35.30	17.10	1.47	22.82	20.93	42.00
Media	7.56	2.74	2.96	-	15.57	1.29	27.84	18.39	34.27

Por otra parte, la fuerza de compresión presentó una alta variabilidad entre agregados (Cuadro 2); sin embargo, el análisis de regresión lineal múltiple explicó una alta proporción de dicha varianza (R^2 = 0.818) entre las variables Ca y diámetro. Asimismo, el Ca influyó (p = 0.004) en la variable fuerza, con una relación inversa. Al respecto,

Wuddivira y Camps-Roach (2007) indicaron que la adición de Ca a suelos con contenidos inicialmente elevados (> 13.87 $cmol_{(+)}$ kg^{-1}) puede incrementar la desagregación; lo cual, se debe al radio de hidratación que estos cationes poseen, por lo que aumenta el espacio basal de los minerales y provoca una mayor hinchazón e inestabilidad (Gouveia y Eudoxie, 2002). Por otra parte, el diámetro también resultó significativo (p = 0.046) y presentó un efecto positivo en la fuerza, tal como lo reportaron Öztaş *et al.* (1999), quienes explican que, a mayor diámetro del agregado, se requerirá una mayor fuerza de compresión para su disgregación.

Cuadro 2. Resultado de ensayo de RC y medidas de agregados.

Muestra	**Interpretación**	**Diámetro** (mm)	**Peso (g)** (g)	**Fuerza** (N)	**Presión** (kPa)
M1-A1	Duro	34.60	12.04	35.11	234.30
M1-A2		34.30	11.08	40.01	266.60
M1-A3		23.20	4.25	9.90	65.70
M2-A1	Moderadamente duro	31.20	9.44	10.40	69.60
M2-A2		28.10	6.85	1.86	12.80
M2-A3		26.80	6.66	2.26	14.70
M3-A1	Duro	30.70	11.21	37.36	249.10
M3-A2		26.50	9.06	31.87	212.80
M3-A3		25.90	7.51	49.43	329.40

El agregado sujeto a interpretación cualitativa de la muestra M1 fue determinado como "duro", donde el valor promedio fue de 28.34 N, que es menor a la clase cualitativa de la clasificación de la Soil Survey Staff, donde el rango propuesto es de 40-80 N; sin embargo, dicha variabilidad es objeto del agregado M1-A3 debido a su menor diámetro y peso. Por otro lado, en la muestra M2 se obtuvo un parámetro cualitativo de "moderadamente duro", con un promedio de 4.84 N, lo cual no coincide nuevamente con su clase correspondiente en la Soil Survey Staff, donde el rango es de 20-40 N. Finalmente, la muestra M3 cuya interpretación fue "duro", obtuvo un promedio muy cercano a su clase correspondiente, a pesar de la diferencia entre pesos y diámetros de los agregados.

CONCLUSIONES

Las variables de Ca y diámetro influyen en la fuerza requerida para ocasionar la ruptura de los agregados. El incremento del diámetro del agregado aumenta la fuerza de ruptura; mientras que el aumento en la concentración de Ca en el suelo disminuye la fuerza de ruptura de los agregados.

El módulo de ruptura digital es un equipo eficiente para la determinación cuantitativa de la consistencia en seco mediante ensayos de RC; sin embargo, el promedio de los valores de fuerza aplicados no coincide con el rango de la interpretación cualitativa de la Soil Survey Staff, lo que refleja las dificultades presentes en la homologación de una evaluación cualitativa con una cuantitativa. La variabilidad en las clases de consistencia

del sistema de clasificación tradicional evidencia la necesidad de ajustes prácticos y metodológicos que permitan ajustar la correlación entre los dos tipos de evaluaciones.

BIBLIOGRAFÍA

Arnold, R.W. & Eswaran, H. (1993). Soil horizon use by the US Soil Survey. Catena, 20*(4)*. 375-381.

Churchward, H.M. (1961). Soil studies at Swan Hill, Victoria, Australia. *Journal of Soil Science,* 12, 73-86.

Cuanalo, H. (1990). Manual para la descripción de perfiles de suelo en el campo. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 40 p.

Gouveia, G. & Eudoxie, G.D. (2002). Relationship between ammonium fixation and some soil properties and effect of cation treatment on fixed ammonium release in a range of Trinidad soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis,* 33, 1751–1765.

Gutiérrez-Castorena, E.V., Silva-Núñez, J.A., Gaytán-Martínez, F.D., Encinia-Uribe, V.V., Ramírez-Gómez, G.A. & Olivares*, E. (2025). Evaluation of Statistical Models of NDVI and Agronomic Variables in a Protected Agriculture System. Horticulturae,* 11, 131.

Ju, B., Wu, K., Zhang, G., Rossiter D.G. & Li, L. (2017). Characterization of Some Calcareous Soils from Henanand Their Proposed Classification in Chinese Soil Taxonomy. *Pedosphere*, 27. 4. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60302-3.

Ortiz, C.A. (2019). Edafología. Ed. Trillas. 102 p.

Öztaş, T.; Sönmez, K. & Canbolat, M.Y. (1999) Strength of Individual Soil Aggregates Against Crushing Forces I. Influence of Aggregate Characteristics. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 23(6). Article 1.

Pal, D.K.; Dasog, G.S.; Vadeveu, S.; Ahuja, R.L. & Bhattacharyya, T. (2000). Secondary calcium carbonate in soils of arid and semi-arid regions of India. *Global Climate Change and Pedogenic Carbonates,* 149-185.

Schelling, J. (1970). Soil genesis, soil classification and soilmsurvey, *Geoderma,* 4, 165-193.

Soil Survey Staff. (2024). Field book for describing and sampling soils, version 4.0. USDA, Natural Resources Conservation Service. U.S. Government Printing Office.

Tandarich, J.P. (2002). History to early-mid 20th century. *Encyclopedia of Soil Science*, 659-662.

Van Reeuwijk L. (2002). Procedures for Soil Analysis, International Soil Reference and Information Centre-Food and Agriculture Organization of the United Nations. 119 p

Weindorf, D.C.; Zhu, Y.; Haggard,B.; Lofton, J.; Chakraborty, S.; Bakr, N.; Lofton, J.J.; Zhang, W.; Weinford, W. & Legoria, M. (2012). Enhanced pedon horizonation using portable X-ray flourescence spectrometry. *Soil Science Society of America Journal,* 76(2), 522-531.

Wuddivira, M.N. & Camps-Roach, G. (2007). Effects of organic matter and calcium on soil structural stability. European *Journal of Soil Science,* 58, 722-727.

DISTRIBUCIÓN IÓNICA DEL PLEISTOCENO A LA ACTUALIDAD EN UN SITIO PALEOPEDOLÓGICO DEL LAGO DE TEXCOCO

Ygor Manuel Ortega-Mikolaev[1]; Ma. de Carmen Gutiérrez Castorena[1]; Carlos Alberto Ortiz Solorio[1]; Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena[2]; Joaquín Arroyo Cabrales[3]; Luis Morett Alatorre[4]

[1] Postgrado en Edafología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carr. México-Texcoco km 36.5, Montecillo, C.P. 56264, Texcoco, Estado de México, México.
[2] Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Calle Francisco Villa S/N, Ex Hacienda el Canadá. General Escobedo, N.L., México.
[3] Laboratorio de Arqueozoologia, Instituto Nacional de Antropología e Historia, CP. 06060, Ciudad de México, México.
[4] Museo de la Agricultura, Universidad Autónoma de Chapingo, CP. 56227, Texcoco, Estado de México, México.

Correo del autor de correspondencia: ygore1@hotmail.com

RESUMEN

Los registros de gradientes salinos y las composiciones iónicas de diferentes áreas del antiguo lago de Texcoco pueden compararse para generar una historia general de los cambios limnológicos ocurridos en los últimos 15-20,000 A.P., en sitios con control cronológico. La comprensión de estos cambios en secciones estratigráficas de sedimentos lacustres es útil para conocer la historia paleolimnológica del Cuaternario, y entender cómo influyó esto en los cambios climáticos del pasado. Una caracterización físico-química en la estratigrafía del yacimiento arqueo-paleontológico de Tocuila fue realizada. Los valores de pH, y CE, de la superficie hasta los 100-110 cm de profundidad indicaron un predominio de alcalinidades y altas concentraciones iónicas. A una profundidad mayor que 110 cm, el pH fue de neutro a ácido; mientras que la CE tuvo concentraciones bajas. Los resultados de hidroquímica mostraron que la estratigrafía estuvo dominada en el sistema pedológico por iones de bicarbonato, calcio y magnesio. Los grupos dominantes iónicos fueron: sulfato de sodio (Na_2SO_4), sulfato de magnesio ($MgSO_4$) y sulfato de calcio ($CaSO_4$). Estos datos indican oscilaciones de concentraciones salinas, con predominio de procesos de evaporación y de ascensión capilar. Por lo cual, los gradientes salinos y su quimismo iónico respondieron a fluctuaciones climáticas e hidrológicas al final del Pleistoceno y principios del Holoceno; lo anterior sugiere escenarios ambientales relacionados con pantanos salinos, que gradualmente cambiaron a pantanos alcalinos.

PALABRAS CLAVE: *Aniones; cationes; estratigrafía; salinidad; Tocuila.*

INTRODUCCIÓN

Los procesos erosivos, hídricos y pluviales desde hace 700,000 A.P. formaron depósitos arcillosos de carácter lacustre e hipersalino en el lago de Texcoco (Carranza-Edwards, 2018; Sedov *et al*., 2010; Cruickshank, 1998). Estos sedimentos en el tiempo geológico formaron arcillas de tipo hidrogel, con alta concentración salina (Marsal y Mazari, 2016;

Fernández-Buces *et al.*, 2006; Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2006; Del Valle, 1983). Un ejemplo de ello es el yacimiento arqueo-paleontológico de Tocuila, que por su litología ha sido reconocido a escala global.

En este yacimiento se han registrado que existieron flujos hídricos salino-sódicos e intemperismo químico de minerales primarios y secundarios, originando características geológicas diferenciales desde finales del Pleistoceno hasta la actualidad (Holoceno). Lo anterior, influyó en su estratigrafía, así como en la conformación de los gradientes salinos en el lago y en los nichos ecológicos de la biodiversidad extinta y actual. Por ello, el objetivo de este trabajo fue caracterizar e interpretar la distribución iónica y de sales solubles en la estratigrafía del yacimiento paleontológico de San Miguel Tocuila, Texcoco. Esta información puede ser útil para comprender el efecto del cambio climático en áreas paleo-lacustres (Marsal y Mazari, 2016; Gutiérrez-Castorena *et al.*, 2006; Ortega, 1993; Del Valle, 1983).

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se realizó en suelos/sedimentos del Pleistoceno-Holoceno, que pertenecen al sitio arqueo paleontológico de Tocuila, en el ex lago de Texcoco, donde el ambiente geomorfológico corresponde a un aluvial-lacustre con evolución de procesos sedimentarios y pedogéneticos de tipo químico y bioquímico, vinculados a procesos de carbonatación y gleyzación (Gutiérrez Castorena *et al.*, 1998); que se ubica en los 19° 31´11´´ N; 98° 54´31´´W, altitud de 2240 msnm (Figura 1 y 2).



Figura 1. Ubicación geográfica de San Miguel Tocuila, en Cuenca de México. (Tomado de Arroyo-Cabrales *et al.*, 2006).



Figura 2. Sitio arqueo-paleontológico de Tocuila, con restos de fauna pleistocénica, principalmente *Mamuthus columbi*.

Se describieron facies de dos perfiles estratigráficos de 380-400 cm de profundidad, abarcando la mayor variabilidad vertical e histórica. Se consideró la posición estratigráfica que guardaron los fósiles de *Mamuthus columbi*. Las descripciones se realizaron de acuerdo con los criterios del Manual para el Levantamiento de Suelos (SSDS, 2017). Posteriormente, se recolectaron 23 muestras de suelo de los diferentes horizontes; 11 muestras en la estratigrafía posición Este (EE) y 12 muestras en la estratigrafía posición Norte (EN). El muestreo se realizó de noviembre a enero de 2020-2021 (Figura 3).

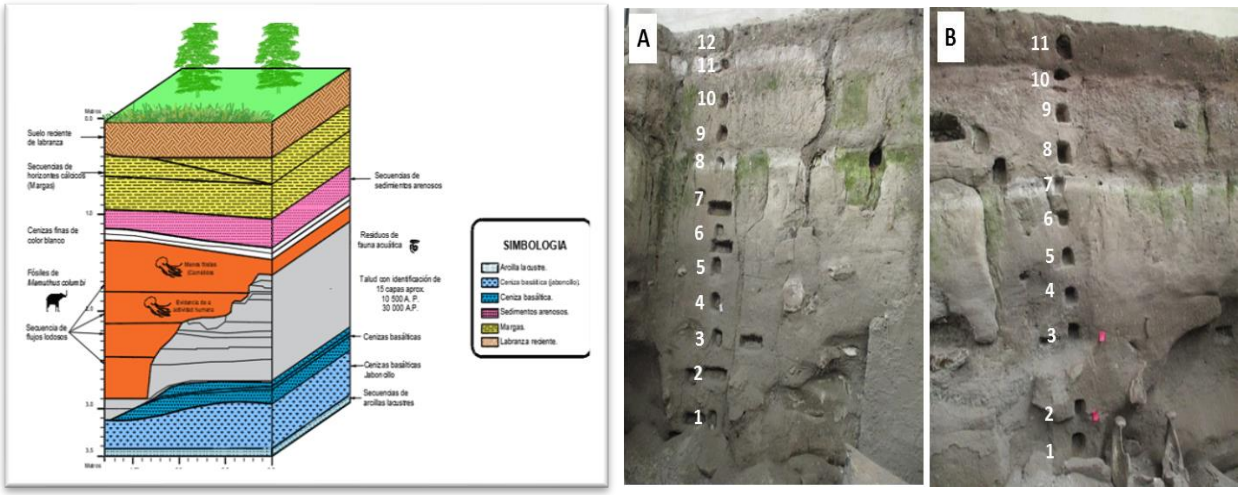


Figura 3. Esquematización de la estratigrafía y de los dos perfiles donde se realizó la recolecta de muestras (cuadros negros); según los horizontes pedogenéticos identificados: a) Pared estratigráfica Este y b) Pared estratigráfica Norte.

En cada muestra de suelo se realizaron las siguientes determinaciones químicas: pH (relación suelo-agua de 1:2.5); conductividad eléctrica (CE) en pasta de saturación, residuo seco evaporado y residuo seco calcinado (por gravimetría), así como calcio, magnesio, carbonatos, bicarbonatos y cloruros (por volumetría), y sodio y potasio (por flamometría). Todos los procedimientos se extrajeron del manual de Van Reeuwijk (2003) y Baird *et al.* (2017), y se realizaron en las instalaciones del Laboratorio de Génesis y Clasificación de Suelos, del Colegio de Posgraduados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La mayor alcalinidad (8.5 de pH) se encontró en los estratos que se encontraban entre los 95 y 110 cm de profundidad, influenciada por elevadas concentraciones tanto de iones de sodio como de carbonatos, propiciando la formación de coloides amorfos silíceos, que fue determinante sobre el pH de estos sedimentos del pleistoceno. Los factores abióticos que más influyeron en la alcalinidad fueron el drenaje, la capilaridad, el incremento de concentración iónica y el escaso aporte hídrico. En contraparte, factores de tipo biótico que tuvieron más influencia fueron la escasa cantidad de materia orgánica (2.45%). Si consideramos la aportación de actividad microbiana anaerobia asociada a procesos de óxido-reducción, a profundidades de 200 cm o más o en horizontes superficiales, aún es

de poca aportación. Los valores de pH fueron generalmente neutros, es decir, oscilaron entre 7.4 y 8.2 (36 a 110 cm de profundidad), en asociación con tipos de sales predominantes: NaCl, Na_2SO_4 y $MgSO_4$.

En general, se puede indicar que en este yacimiento se presentaron fenómenos de ascensión capilar, debido a procesos de evapotranspiración en los sedimentos más superficiales (0-90 cm de profundidad), por la presencia de vegetación palustre; que son más acordes a las condiciones climáticas actuales. En la Figura 4 se observa la distribución de la composición iónica de forma vertical (0-300 cm de profundidad) en la estratigrafía del yacimiento de Tocuila).

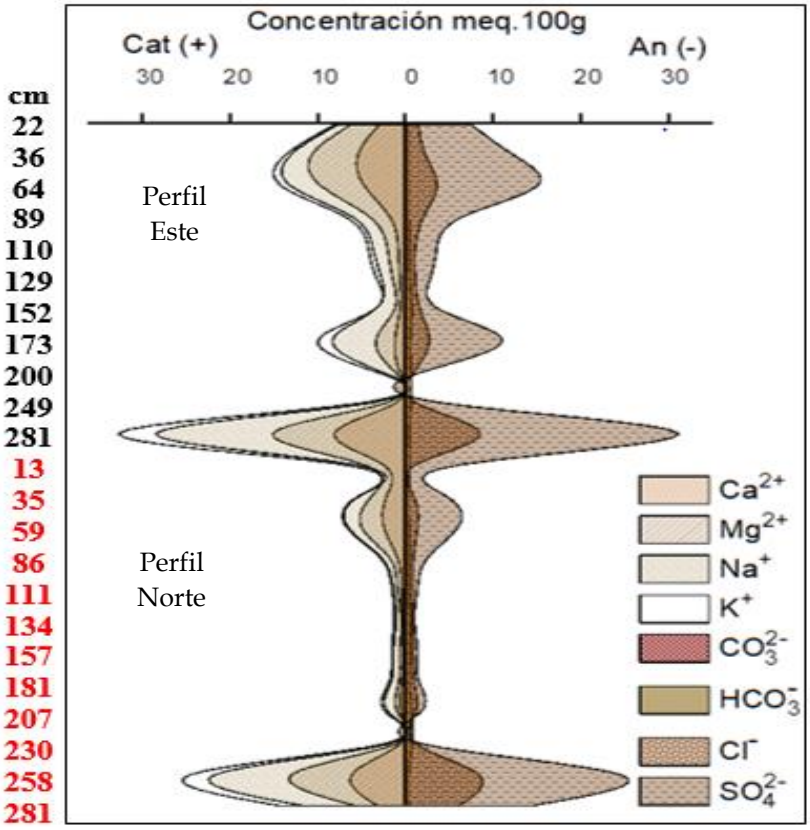


Figura 4. Distribución de aniones y cationes a lo largo de la profundidad del yacimiento paleontológico de Tocuila.

A lo largo de los milenios, los perfiles litológicos del yacimiento de Tocuila se saturaron con flujos hídricos salino-sódicos debido en primer lugar a los sedimentos detríticos, como materiales volcánicos y, en segundo término, al intemperismo químico de los minerales primarios y secundarios influidos por las oscilaciones hídricas del lago de Texcoco (Ortega, 1993; Del Valle, 1983).

CONCLUSIONES

Debido a retrocesos paulatinos a lo largo de 15-20,000 A.P., en los límites hídricos del exlago de Texcoco, los perfiles litológicos se enriquecieron con la dominancia de las siguientes series iónicas: sulfato de sodio (Na_2SO_4), sulfato de magnesio ($MgSO_4$) y sulfato de calcio ($CaSO_4$). Se propone que existieron escenarios ambientales graduales de pantanos salinos que se modificaron a pantanos alcalinos.

BIBLIOGRAFÍA

Arroyo-Cabrales, J. Polaco, O.J. & Jonhson, E. (2006). A preliminary view of coexistence of Mammoth and early peoples in Mexico. *Quaternary International*, 142-143. 79-86.

Baird, R.B., Eaton, A.D. & Rice, E.W. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewaters. In Water Environment Federation, Chair Eugene W. Rice, American Public Health Association Andrew D. Eaton, American Water Works Association (23rd Edition). American Water Works Association (AWWA, WWEF and APHA).

Carranza-Edwards, A. (2018). Correlación litológica del subsuelo del ex lago de Texcoco. *Hidrobiología,* 28 (1): 93-101.

Cruickshank, G.G. (1998). Proyecto Lago de Texcoco, rescate hidro-ecológico. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). México D. F. 85 p.

Del Valle, C.H. (1983). Los procesos de acumulación de sales e intemperismo en cubetas lacustres en una zona de transición del ex-lago de Texcoco. M. C. Tesis, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México, pp. 556.

Fernández-Buces, N., Siebe, C., Cram, S., & Palacio J.L. (2006). Mapping soil salinity using a combined spectral response index for bare soil and vegetation: A case study in the former lake Texcoco, Mexico. *Journal of Arid Environments,* 65: 644-667.

Gutiérrez-Castorena, M.C., Stoops G. & Ortiz Solorio, C.A. (1998). Carbonato de calcio en los suelos del ex lago de Texcoco. *Terra Latinoamericana*, 16(1):11-19.

Gutiérrez-Castorena, M.C., Stoops, G., Ortiz-Solorio, C.A. & Sánchez Guzmán, P. (2006). Micromorphology of opaline features in soils on the sediments of the ex-lago de Texcoco, Mexico. *Geoderma,* 132, 98-104.

IUSS Working Group WRB (International Union of Soil Sciences-World Reference Base for Soil Resources). (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014. Actualización 2015 Sistema Internacional de Clasificación de Suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos 106. Roma, Italy: FAO.

Marsal, R.J. & Mazari, M. (2016). El subsuelo de la Ciudad de México. México: UNAM, Instituto de Ingeniería.

Ortega, E.M. (1993). Causas del ensalitramiento y sus efectos sobre los suelos. Centro de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 56 pp.

Sedov, S., Lozano-García, S., Solleiro-Rebolledo, E., McClug de Tapia, E., Ortega-Guerrero, B. & Sosa-Najera, S. (2010). Tepexpan revisited: A multiple proxy of local environmental changes in relation to human occupation from a paleolake shore section in Central Mexico. *Geomorphology,* 122. 309-322.

SSDS. Soil Science Division Staff. (2017). *Soil survey manual*. Washington, D.C. USDA.

Van Reeuwijk, L. P. (2003). Procedimientos para análisis de suelos. Trad. al español por MC Gutiérrez Castorena, CA Tavares E. y CA Ortiz Solorio. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.

ESTUDIO ETNOPEDOLÓGICO DE LOS SUELOS DE TERRAZAS AGRÍCOLAS EN EL SUR DE PUEBLA

Javier Leonardo Toxqui Roldán[1]; Carlos Alberto Ortiz Solorio[1]; Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena[1]

[1] Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, CP. 56264. Texcoco de Mora, Edo. de México, México.

Correo del autor de correspondencia: toxqui.javier@colpos.mx

RESUMEN

Las terrazas agrícolas han sido esenciales para el desarrollo agrícola en distintas culturas del mundo, ya que proporcionan suelos de alta calidad agrícola, con mayor fertilidad, humedad y contenido de carbono orgánico y nitrógeno. En México, las investigaciones sobre Anthrosols son escasas. En este trabajo se analizaron los suelos formados en sistemas de terrazas y la clasificación campesina de tierras en la comunidad agraria de Santiago Acatepec, Puebla; lugar que, cuenta con una extensión significativa de terrazas agrícolas. Para ello, se aplicó la metodología de cartografía de tierras campesinas, que combina entrevistas a productores, recorridos de campo y muestreo superficial de suelos, con el fin de determinar sus propiedades físicas y químicas. Los campesinos identificaron ocho clases de tierra basadas en criterios agrícolas que correspondieron a las propiedades de laboratorio. Los suelos de las terrazas se clasificaron como Terric Anthrosols según la WRB y como Haplustolls según la Taxonomía de Suelos. Todos los suelos presentan textura franca, alto contenido de materia orgánica, pH alcalino y elevada saturación de bases. La formación del suelo ha implicado procesos como la antrosolización, la melanización y la argiluviación. Los resultados ponen de manifiesto la importancia de la clasificación local y sugieren que la gestión futura debería orientarse a aumentar la materia orgánica y el fósforo mediante prácticas agroecológicas para mantener la fertilidad a largo plazo.

PALABRAS CLAVE: *Anthosols; antropedogénesis; conocimiento ancestral; etnoedafología; tecnología agrícola.*

INTRODUCCIÓN

Las terrazas agrícolas han sido esenciales para el desarrollo agrícola en distintas culturas del mundo (Sandor *et al*., 2021; Sandor y Homburg, 2017; Sandor y Furbee, 1996). Entre los principales beneficios de las terrazas agrícolas sobre los suelos se incluyen el incremento de la fertilidad, mayor disponibilidad de humedad y aumento de carbono y nitrógeno orgánico, entre otros (Wei *et al*., 2016). En México, se han realizado estudios sobre terrazas agrícolas (Pérez-Sánchez, 2019); no obstante, investigaciones enfocadas específicamente en suelos antropogénicos son escasas (p.ej., Solís y Bocco, 2018). El presente estudio tuvo como objetivo analizar los suelos formados en sistemas de terrazas agrícolas y la clasificación local de las tierras de la comunidad agraria de Santiago Acatepec (Puebla).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en los Bienes Comunales de Santiago Acatepec, en el municipio de Caltepec (Puebla), que tienen una superficie de 10,366 ha. El clima es BSk, semiárido templado-frío, con una precipitación media anual de 557 mm (SMN, 2011). La litología, según el SGM (1982), incluye lutita-caliza, arenisca-toba andesítica, toba andesítica-arenisca, rocas metasedimentarias y depósitos aluviales. Para documentar la clasificación local de los suelos, se aplicó la metodología de cartografía de tierras propuesta por Ortiz-Solorio *et al*. (1990), que incluyó la elaboración de un mapa base, la selección de informantes clave, entrevistas y recorridos de campo para ubicar y caracterizar cada tipo de suelo.

Se recolectaron 64 muestras superficiales de suelo (0-30 cm) de cada clase para determinar su textura, contenido de materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, punto de marchitez permanente, capacidad de campo, densidad aparente, fósforo disponible (P-Olsen), así como los contenidos de potasio, calcio y magnesio, siguiendo los procedimientos de Van Reeuwijk (2002). La clasificación científica de los suelos se realizó mediante su descripción morfológica, el análisis de laboratorio y su identificación taxonómica, conforme a la Base de Referencia Mundial del Recurso Suelo [WRB, por sus siglas en inglés] (IUSS Working Group WRB, 2022) y a las Claves para la Taxonomía de Suelos (SSS, 2022).

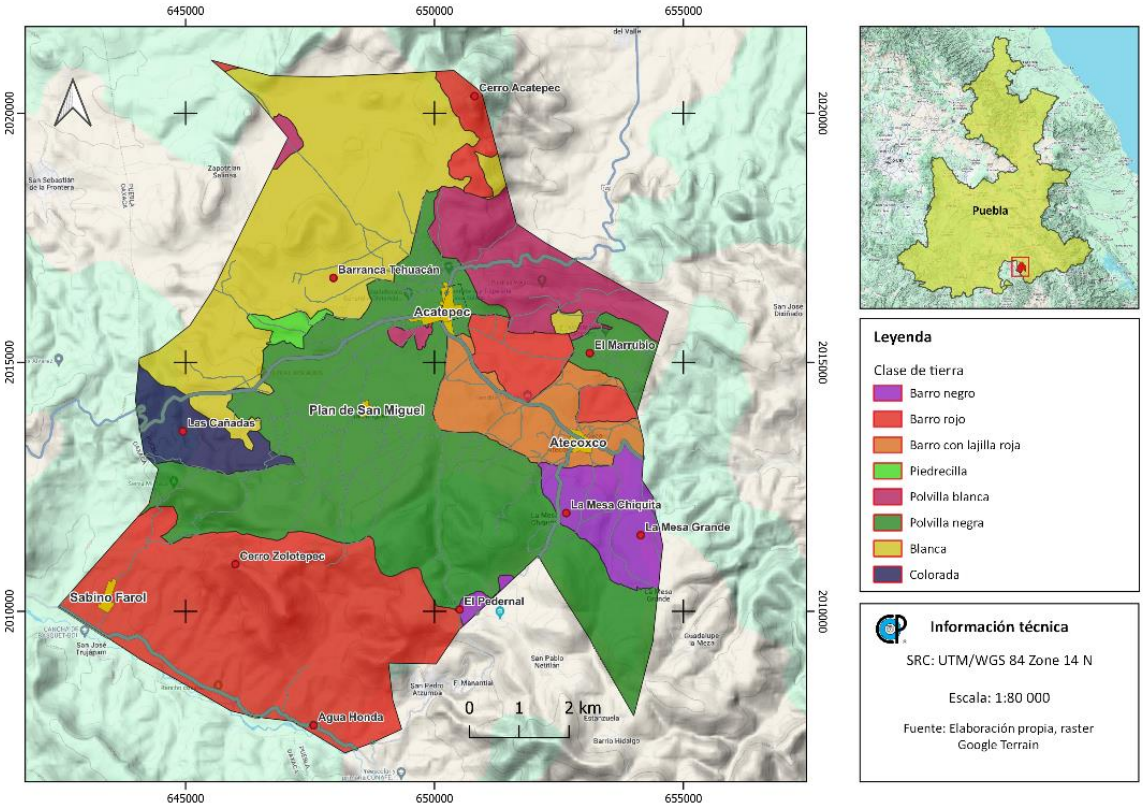


Figura 1. Mapa de clases de tierra de Santiago Acatepec, Puebla.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la comunidad de Santiago Acatepec se localizaron ocho clases de tierra: polvilla negra, polvilla blanca, barro rojo, barro negro, barro con lajilla roja, blanca y colorada, y piedrecilla (Figura 1). Los atributos que identifican los productores, en términos edafológicos, corresponden principalmente al color, la textura, el espesor del horizonte superficial, el grado de pedregosidad, la capacidad de retención de humedad, los cultivos mejor adaptados y la fertilidad, inferida esta última a partir del rendimiento agrícola y de la agrobiodiversidad asociada.

Todas las clases de tierra descritas tienen texturas dentro del rango franco, que se considera óptimo para las labores agrícolas (Cuadro 1). Además, se observa un elevado contenido de materia orgánica a pesar de que se trata de suelos en uso agrícola. El pH es, en general, alcalino, y no se han detectado problemas de salinidad. Los porcentajes de agua disponible son suficientes para garantizar la producción en años con precipitaciones dentro de la media histórica. Del mismo modo, no se registran problemas significativos de compactación, excepto en el caso de la tierra colorada.

Cabe señalar que, en aquellos suelos cuyo pH supera el valor de 8, podría producirse una fijación de fósforo en interacción con carbonato de calcio (Weil y Brady, 2017). Los elevados contenidos de potasio, calcio y magnesio se deben al material parental de los sedimentos.

Cuadro 1. Características químicas y físicas de la capa arable del suelo

Clase de tierra	Textura	MO†	pH	CE	CC	PMP	AD	DAP	P	K	Ca	Mg
		%		dS m^{-1}	%	%	%	g cm^{-3}	mg kg^{-1}	$cmol_{(+)}$ kg^{-1}		
Polvilla negra	Franco	2.8	8.0	0.3	48	32	16	1.1	14.3	1.5	51.4	9.7
Barro rojo	Franco-arenoso	2.8	8.3	0.2	26	13	13	1.3	8.8	0.8	15.9	4.6
Tierra blanca	Franco-arenoso	2.7	7.9	1.1	47	31	16	1.1	19.7	0.9	38.3	16.1
Polvilla blanca	Franco-arenoso	3.8	8.0	0.3	43	27	16	1.1	12.0	0.5	44.3	7.9
Barro con lajilla roja	Franco-limoso	2.4	8.1	0.1	33	17	15	1.3	12.8	0.2	31.9	9.9
Barro negro	Franco-arcilloso	2.5	7.4	0.3	53	36	16	1.2	8.2	0.4	39.8	11.6
Tierra colorada	Franco-arenoso	0.9	7.6	0.1	14	7	6	1.5	12.2	0.40	7.4	1.8
Piedrecilla	Franco	2.1	8.0	0.2	33	22	10	1.2	10.5	0.51	36.4	5.4

†MO: materia orgánica; pH: potencial hidrógeno; CE: conductividad eléctrica; PMP: punto de marchitez permanente; AD: agua disponible; DAP: densidad aparente.

Los suelos localizados en terrazas agrícolas se clasificaron como Terric Anthrosols (IUSS Working Group WRB, 2022) y como Haplustolls (SSS, 2022). Por su parte, los suelos no asociados con terrazas agrícolas (naturales) corresponden a suelos poco desarrollados, aunque con alto contenido de materia orgánica y elevada saturación de bases (INEGI,

2007). Existe una correspondencia entre las clases de tierra identificadas y la clasificación de suelos antrópicos y naturales (Cuadro 2).

Cuadro 2. Clasificación local y científica de los suelos de Santiago Acatepec

Clase de tierra	Clasificación del suelo antrópico	Clasificación del suelo natural (INEGI, 2007)
Polvilla negra	Terric Anthrosol	Eutric Regosols/Eutric Leptosols
Barro Rojo	Terric Anthrosol	Eutric Regosols/Eutric Leptosols
Tierra Blanca	Terric Anthrosol	Eutric Regosols/Eutric Leptosols
Polvilla Blanca	Terric Anthrosol	Eutric Regosols/Eutric Leptosols
Barro con Lajilla Roja	Terric Anthrosol	Eutric Leptosols
Barro Negro	Terric Anthrosol	Pellic Vertisols
Tierra Colorada	Terric Anthrosol	Eutric Regosols
Piedracilla	Terric Anthrosol	Eutric Regosols

Estudios comparativos realizados en otras regiones con sistemas de terrazas han documentado igualmente la presencia de horizontes móllicos (Sandor y Homburg, 2017), así como contenidos de fósforo y materia orgánica incluso superiores a los registrados en Acatepec (Itkin *et al*., 2022; Sandor *et al*., 2021). En este sentido, el manejo de los suelos de la comunidad debería orientarse al incremento de su fertilidad mediante el aporte de materia orgánica y fósforo, preferentemente a través de enmiendas agroecológicas.

Los procesos de formación de suelos más relevantes que se identificaron en las muestras de Acatepec fueron: antrosolización, melanización y argiluviación. Si bien, los procesos de formación de suelos explican la génesis de los suelos naturales, los suelos de origen antrópico deben interpretarse desde la perspectiva de la antropedogénesis, un concepto emergente en edafología (Vasilchenko y Vasilchenko, 2024; Itkin *et al*., 2022; Yaalon y Yaron, 1966). Esto implica que la construcción de una terraza agrícola debe considerarse el punto de partida temporal (tiempo cero) en la evolución de estos suelos.

CONCLUSIONES

La terraza agrícola constituye una tecnología capaz de generar suelos de alta calidad agrícola. Los campesinos de Santiago Acatepec han desarrollado una clasificación local de suelos basada en criterios agrícolas, la cual presenta correspondencia con las propiedades físicas y químicas determinadas en laboratorio. En contraste, la clasificación científica tiende a simplificar esta diversidad de clases de tierra en un único tipo de suelo de origen antrópico: Terric Anthrosol.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación pudo ejecutarse gracias al financiamiento de la SECIHTI a través de la Beca de Posgrado Nacional para maestría y el apoyo de la Comunidad Agraria de Santiago Acatepec, Caltepec, Puebla.

BIBLIOGRAFÍA

INEGI. (2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250000. Serie II. Continuo Nacional Orizaba.

Itkin, D., Poch, R.M., Curtis Monger, H., Shaanan, U., Bolòs, J., Crouvi, O., Ben Hagai, N. & Goldfus, H. (2022). Pedology of archaeological stone-wall bench terraces. *Geoderma,* 428, 116129. https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2022.116129.

IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps (4a ed.). International Union of Soil Sciences (IUSS).

Ortiz-Solorio, C.A., Pájaro-Huertas, D. & Ordaz-Chaparro, V.M. (1990). Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie Cuadernos de Edafología 15 (1a ed.). Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. https://www.researchgate.net/publication/304156628.

Pérez-Sánchez, J.M. (2019). Agricultural Terraces in Mexico. En M. Varotto, L. Bonardi, & P. Tarolli (Eds.), World Terraced Landscapes: History, Environment, Quality of Life (pp. 159–176). Springer Cham. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-96815-5_10.

Sandor, J.A., & Homburg, J.A. (2017). Anthropogenic Soil Change in Ancient and Traditional Agricultural Fields in Arid to Semiarid Regions of the Americas. *Journal of Ethnobiology,* 37(2), 196–217. https://doi.org/10.2993/0278-0771-37.2.196.

Sandor, J.A., Huckleberry, G., Hayashida, F.M., Parcero-Oubiña, C., Salazar, D., Troncoso, A. & Ferro-Vázquez, C. (2021). Soils in ancient irrigated agricultural terraces in the Atacama Desert, Chile. *Geoarchaeology,* 16(24), 1–24. https://doi.org/10.1002/gea.21834.

SGM. Servicio Geológico Mexicano. (1982). GeoInfoMex. Carta Geológico-Minera Orizaba E14-6 Escala 1:250 000. https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/#.

SMN. Servicio Meteorológico Nacional. (2011). Normales climatológicas por estado. Normales Climatológicas Estación Acatepec 21002 (1981-2010). https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales_Climatologicas/Normales8110/pue/nor8110_21002.TXT.

SSS. Soil Survey Staff. (2022). Keys to Soil Taxonomy (13a ed.). USDA Natural Resources Conservation Service.

Solís, B. & Bocco, G. (2018). Terraces and landscape in Mixteca Alta, Oaxaca, Mexico: micromorphological indicators. *Spanish Journal of Soil Science,* 8(2), 194–213. https://doi.org/10.3232/SJSS.2018.V8.N2.05.

van Reeuwijk, L.P. (2002). Procedures for soil analysis (L. P. Van Reeuwijk, Ed.; 6a ed.). ISRIC FAO.

Vasilchenko, A.V. & Vasilchenko, A.S. (2024). Plaggic anthrosol in modern research: Genesis, properties and carbon sequestration potential. *Catena,* 234. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107626

Wei, W., Chen, D., Wang, L., Daryanto, S., Chen, L., Yu, Y., Sun, G. & Feng, T. (2016). Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing. En Earth-Science Reviews (Vol. 159, pp. 388–403). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.06.010.

Weil, R.R. & Brady, N.C. (2017). The Nature and Properties of Soils (Fox, D. & Gilfillan, A., Eds.; 15a ed., Vol. 1). Pearson Education Limited.

Yaalon, D.H. & Yaron, B. (1966). Framework for man-made soil changes - An outline of metapedogenesis. *Soil Science,* 102, 272–277. https://doi.org/10.1097/00010694-200606001-00021.

EVALUACIÓN DE LA MACRO Y MICROPOROSIDAD EN SISTEMAS DE LABRANZA DE CONSERVACIÓN Y CONVENCIONAL POR MICROFOTOMOSAICOS

María Fernanda Godinez-Montemayor[1]; Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena[1]; Vicente Vidal Encinia Uribe[1;] Diego Emilio Pérez Martínez[1]; Martin Espinosa Ramírez[2]; Rocío Citlali Gutiérrez de la Garza[3]

[1] Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, C.P. 66050, Nuevo León, México.

[2] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarios Río Bravo, Km.61 Carretera Matamoros, Primero de Mayo, 88900 Cdad. Río Bravo, Tamaulipas, México.

[3] Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Del. Coyoacán 04510, CDMX, México.

Correo del autor de correspondencia: edgar.gutierrez@uanl.edu.mx

RESUMEN

El deterioro de los suelos agrícolas representa un problema para la agricultura moderna mundial, debido a que los sistemas de labranza ocasionan cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, ocasionando pérdida de su fertilidad y haciéndolos susceptibles a la erosión. Para ello, se continúan proponiendo y modificando métodos de evaluación, siendo una de ellas la micromorfometría. Esta metodología permite analizar la arquitectura del suelo a escala microscópica, aportando datos cuantificables relacionados con la distribución del espacio poroso. El objetivo fue cuantificar la porosidad del suelo en sección delgada de suelo mediante la micromorfometría en tres sistemas de labranza: conservación (LC), mecanizada (LM) y no labranza (NoLab)) en parcelas cultivadas por más de una década, en el campo experimental de INIFAP Río Bravo, Tamaulipas. La investigación se inició en 2014 y concluyó en 2024 con muestreos en los años 2018 y 2022. El manejo en las distintas parcelas fue LM (subsolado, arado, rastra y sembradora), LC (sembradora) y NoLab (testigo natural sin alterar). Se excavaron pozos pedológicos hasta profundidades de 120 cm en cada sistema de labranza a fin de colectar núcleos inalterados en la capa superficial para la elaboración de secciones delgadas y su posterior análisis micromorfométrico. La macroporosidad disminuyó con el paso del tiempo en los sistemas de LM y NoLab, provocando problemas de compactación y colapso del sistema. El sistema de LC fue el único en mantenerse estable en la distribución del tamaño y frecuencia de meso y macroporos, representando el equilibrio entre la conversión hídrica y el agua disponible para las plantas.

PALABRAS CLAVE: *Agricultura sostenible; análisis de imágenes; microestructura del suelo; morfología de poros; perturbación del suelo.*

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de labranza son un factor importante en el manejo de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Sin embargo, el uso inadecuado de maquinaria agrícola puede provocar efectos negativos en la estructura del suelo, y disminución de la materia orgánica, lo que ocasiona que se obtengan bajos rendimientos (Huang *et al*., 2025). Por lo que el manejo eficiente de las técnicas utilizadas en la labranza se ha convertido en un elemento clave para promover una producción de cultivos sostenible. La continua utilización de maquinaria, como parte de la preparación de los suelos en la agricultura, altera al sistema suelo; modifica la organización estructural *in situ* del suelo, lo que acelera la degradación de los agregados y pone en riesgo la estabilidad del sistema edáfico (Guo *et al*., 2020).

El resultado es la formación de pisos de arado y baja estabilidad de agregados; esto ocasiona que, el sistema poroso se modifique, influyendo en la conductividad hidráulica, lo que provoca una disminución de agua para los cultivos. No obstante, información relacionada con el análisis de los sistemas de labranza en un largo periodo de tiempo, a escalas detalladas del suelo, es escasa. En este sentido, la infiltración del agua es resultado de la distribución del tamaño de poros (Han *et al*., 2024).

La distribución de los poros en el suelo tiene un impacto en el movimiento del agua, la disponibilidad de nutrientes, la difusión del oxígeno, el crecimiento de raíces y la actividad de la fauna edáfica (Bölscher *et al*., 2021). Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue analizar a nivel microscópico la porosidad del suelo bajo tres sistemas de labranza: labranza de conservación (LC), labranza mecanizada (LM) y no labranza (NoLab).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en parcelas experimentales destinadas a sistemas de rotación de cultivos: maíz (*Zea mays*) con sorgo (*Sorghum bicolor (L.) Moench*) y maíz con frijol (*Phaseolus vulgaris L.*), ubicadas en el municipio de Rio Bravo, Tamaulipas (25°57´54" N, 98°00'58" W). Estas parcelas se encuentran a 34 msnm, en una zona con una precipitación media anual de aproximadamente de 453 mm. El material parental es de origen sedimentario de naturaleza calcárea.

El suelo de cada parcela se clasificó científicamente de acuerdo con la WRB 2022 (IUSS Working Group WRB, 2022) y se manejaron con dos sistemas de labranza por ocho años consecutivos (2014-2022).

La LC consistió en tres riegos al año, aplicación de gallinaza y lixiviados orgánicos (300 L ha^{-1}); además, se conservaron los residuos de la cosecha anterior en el terreno y únicamente se utilizó sembradora para establecer el cultivo. En la LM se realizan labores más intensas como la labranza profunda, con subsuelo cada cuatro años, paso de arado de vertedera en cada ciclo, y el uso de rastras cruzadas para preparar la cama de siembra y al final sembradora. Como testigo (NoLab), se seleccionó un área natural, la cual pertenece a la misma serie de suelo que LM, pero no es destinada para producción. En el

suelo de cada parcela se extrajo un núcleo inalterado en la capa superficial a una profundidad de 7 cm, utilizando cajas tipo Kübiena (5 x 7 x 7 cm).

De cada núcleo se elaboraron secciones delgadas (SD) para los análisis micromorfológicos. Las SD se fotografiaron sistemáticamente (60-70 imágenes, objetivo 2x) con una cámara Canon, acoplada a un microscopio petrográfico. Tres fuentes de luz se utilizaron: luz plana (LP), luz cruzada (LC) y luz retardada (LR). Los microfotomosaicos se construyeron a partir de estas imágenes utilizando los programas ArcMap 10.5 y ERDAS IMAGINE 2014. Finalmente, la cuantificación de la porosidad total del suelo se realizó mediante clasificación supervisada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos se clasificaron como Calcic Tonguic Kastañozem en LC; Haplic Calcisols en LM, y en NoLab como Haplic Calcisols (WRB, 2022). Los datos revelaron que el sistema de LM en 2018 mostró predominancia de mega y macroporos (9.33%) (Cuadro 1); sin embargo, para el año 2022, estos disminuyeron (4.74%), lo cual indica una compactación gradual con el paso de los años debido a alteración estructural por actividades antropogénicas favoreciendo el colapso del sistema suelo y reduciendo la aireación.

Por otra parte, en el sistema de LC el porcentaje de porosidad se mantuvo estable en los años 2018 (26.75%) y 2022 (26.28%), ocurrió una redistribución de los poros, obteniendo un incremento de micro y mesoporos; lo que refleja un equilibrio entre la perturbación controlada y la preservación estructural del suelo en LC, existiendo un balance entre los tipos de poros.

Respecto a NoLab se presentó una reducción con relación a la porosidad total en 2018 (30.80%) y 2022 (15.37%) se generó una estabilización estructural con una menor conectividad porosa. En LM ocurrió una redistribución de poros entre 2018 y 2022: los poros fisura disminuyeron del 70% al 15%, en contraste, los poros cavidad se incrementaron del 30% al 85%.

La organización en LC en 2018 fue: fisura 45%, cavidad 45% y canal 10%, y para el año 2022: fisura: 35% y cavidad en estrella 75%, por último, en NoLab en 2018 se identificaron cavidad en estrella (70%) y cavidad (30%), para el año 2022 cavidad 90% y fisura 10%. Los poros fisura facilitan el flujo direccional y rápido del agua; asimismo, los poros cámara facilitan el flujo de agua rápido a través del perfil del suelo, en contraste, los poros cavidad, aunque permiten el almacenamiento de agua, no facilitan el flujo continuo (Stoops, 2010).

La LC en nuestro estudio ofrece perspectivas complementarias en la búsqueda del objetivo, el cual es optimizar el recurso suelo y agua, a través de la optimización del sistema poroso (Yuan *et al*., 2025). Si bien, la LM incrementa la porosidad total del suelo e incrementa la conductividad hidráulica (Shaheb *et al*., 2021), estos resultados pueden ser temporales (Schneider *et al*., 2017), si no se implementan prácticas de manejo que permitan aumentar la estabilidad de agregados.

Cuadro 1. Cuantificación de área y tamaño de poro en sección delgada en porcentaje.

		2018			2022		
		NoLab†	LM	LC	NoLab	LM	LC
MICRO	Fino	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Medio	0.49	0.32	0.50	0.30	0.33	1.08
	Grueso	0.99	0.81	0.93	1.16	1.07	2.24
MESO	Fino	1.32	1.58	1.38	1.97	1.78	3.11
	Medio	1.76	2.48	1.75	2.68	2.46	3.68
	Grueso	2.83	3.81	3.00	4.02	3.48	4.26
MACRO	Fino	2.53	2.69	2.87	2.78	1.84	2.81
	Medio	1.92	3.14	3.81	2.08	1.62	1.83
	Grueso	4.69	2.34	7.74	0.38	1.28	2.44
MEGA	Fino	0.00	1.16	0.70	0.00	0.00	4.83
	Medio	0.00	0.00	4.07	0.00	0.00	0.00
	Grueso	14.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Área total poros		30.80	18.33	26.75	15.37	13.86	26.28
Área total agregados		69.20	81.67	73.25	84.63	86.14	73.72

†NoLab = No labranza; LM: Labranza mecanizada; LC: Labranza de conservación.

Al respecto, Six *et al*. (2004) indicaron que la mínima perturbación permite que complejos órgano-minerales se establezcan para mantener la estructura porosa a largo plazo, describiéndolo como "jerarquía de agregación estable", lo cual concuerda con lo reportado en LC en esta investigación.

CONCLUSIONES

El sistema de LM presentó un decremento de la porosidad total (de 18.33% a 13.86%) y una redistribución de poros fisura hacia poros cavidad, los cuales limitan el flujo continuo de agua. El sistema NoLab reportó disminución de la porosidad total (de 30.80% a 15.37%) presentando una de conectividad porosa. En contraste, el sistema LC mantuvo estabilidad en la porosidad (de 26.75% a 26.28%) manteniendo el flujo de agua en el sistema suelo durante el período evaluado debido a la presencia de poros fisura, así mismo contribuye al almacenamiento de agua y nutrientes debido al incremento en los micro y mesoporos, manteniendo un equilibrio entre la perturbación controlada y la preservación estructural. Los resultados demuestran que las labores agrícolas intensivas (LM) en los suelos de Noroeste de México pueden tener consecuencias de compactación debido a las actividades antropogénicas, mientras que la ausencia de labranza (NoLab) puede producir una estabilización estructural excesiva limitando el flujo hídrico, por lo que la LC representó la estrategia más viable a mantener la salud del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

Bölscher T., Koestel J., Etana A., Ulén B., Berglund K. & Larsbo M. (2021). Cambios en las redes de poros y en el suelo fácilmente dispersable tras el encalado estructural de suelos arcillosos *Geoderma,* 390:114948

Guo, Y., Fan, R., Zhang, X., Zhang, Y., Wu, D., McLaughlin, N., Zhang, S., Chen, X., Jia, S. & Liang, A. (2020). Tillage-induced effects on SOC through changes in aggregate stability and soil pore structure. *Sci Total Environ,* 703:134617.

Han, J., Li, J., Jiang, Y., Wang, D., Chen, Q. & Zhang, X. (2024). Effect of long-term strip tillage on soil macropore structure in cool black soil region of Northeast China. *Land Degradation & Development,* 35(1), 484-495.

Huang, C., Chen, H., Liu, X., Ma, S., Li, Y., Zhang, Z., Tang, H., Wang, X. & Liu, Z. (2025). Effects of biochar on soil N2O emissions, aggregate stability and nutrients under subsoiling and rotary tillage in wheat-maize rotation systems. *Journal of Agriculture and Food Research,* 102208, 102208.

IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps (4a ed.). International Union of Soil Sciences (IUSS).

Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O. & Seidel, S.J. (2017). The effect of deep tillage on crop yield–What do we really know?. *Soil and tillage research,* 174, 193-204.

Shaheb, M.R., Venkatesh, R., & Shearer, S.A. (2021). A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. *Journal of Biosystems Engineering,* 46(4), 417-439.

Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and tillage research*, 79(1), 7-31.

Stoops, G., Marcelino, V. & Mees, F. (eds) 2010. Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths, Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands. 720p.

Yuan, S., Li, Z., Li, P., Xu, Y., Wang, F., Yang, N y Zhang, L. (2025). El subsolado mejora la conectividad de los poros del suelo y la eficiencia del uso del agua en el trigo de invierno al optimizar la estructura porosa. *Soil and Tillage Research,* 236, 105927.

PREDICCIÓN DEL pH DEL SUELO MEDIANTE MODELOS ESTADÍSTICOS TRADICIONALES Y APRENDIZAJE AUTOMÁTICO EN NUEVO LEÓN

Gustavo Andrés Ramírez Gómez[1]; Vicente Vidal Encinia Uribe[2]; Edgar Vladimir Gutiérrez Castorena[2]; Juan Carlos Sandoval Aparicio[1]; Sandra Monserrat Barragan Maravilla[3]; Gabriel Alejandro Hernandez Vallecillo[3]

[1] Colegio de Postgraduados, Carretera México-Texcoco, km 36.5, Montecillo, CP. 56264, Texcoco, Estado de México, México.
[2] Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, Francisco I. Madero S/N, Col. Ex. Hacienda el Canadá, CP. 66050, General Escobedo, Nuevo León, México.
[3] Unidad de Biología, Tecnología y Prototipos, Facultad de Estudios Superiores – Iztacala, Av. de los Barrios 1, Los Reyes Iztacala, CP. 54090, Tlalnepantla de Baz, Estado de México, México.

Correo del autor de correspondencia: ramirez.andres@colpos.mx

RESUMEN

Se modeló el pH del suelo en Nuevo León utilizando datos topográficos y métodos estadísticos y de machine learning. Se evaluaron modelos OLS, GLM, GAM y algoritmos como XGB. El GAM-Gamma y XGB mostraron mejor desempeño. Los resultados sugieren relaciones complejas que requieren enfoques avanzados para mejorar la precisión predictiva.

PALABRAS CLAVE: *Aprendizaje automático; análisis espacial del suelo; GAMM.*

INTRODUCCIÓN

El pH del suelo es un indicador esencial para evaluar la salud y productividad de los ecosistemas agrícolas y naturales (de Jesús Velázquez-Chávez *et al.,* 2023; Estrada-Herrera *et al.,* 2017). En México, especialmente en Nuevo León, la disponibilidad de datos sobre este parámetro es limitada y dispersa, lo que dificulta el diseño de estrategias de manejo sostenible (Gaytán-Martínez *et al.,* 2015).

Ante esta situación, se han empleado modelos estadísticos y de machine learning para optimizar el uso de los datos existentes. Modelos tradicionales como la regresión lineal ordinaria (OLS) permiten identificar relaciones entre variables del suelo (Yu *et al.,* 2019), pero no capturan las relaciones no lineales ni los efectos espaciales. En contraste, modelos más flexibles como los Modelos Aditivos Generalizados (GAM) con efectos aleatorios permiten representar mejor la variabilidad local (Zuur *et al.,* 2009), mientras que las técnicas de machine learning integran múltiples variables ambientales, mejorando la precisión predictiva incluso con datos limitados (Zeraatpisheh *et al.,* 2019).

Estas herramientas permiten generar estimaciones más precisas del pH del suelo, apoyando decisiones en agricultura, conservación y manejo de tierras en regiones con escasa información como Nuevo León. Se emplean GAM con efecto aleatorio (Topoforma) e interacción espacial Latitud–Longitud, junto con enfoques de machine learning, comparando su desempeño frente a OLS; se plantea que los GAM capturan

mejor la variabilidad local y, con pendiente y altitud, alcanzan precisión comparable a ML con mayor.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el estado de Nuevo León, México. Para la modelación del pH del suelo, se utilizaron como variables aleatorias predictoras las topoformas, las cuales se categorizaron únicamente para los modelos GLMM y GAMM, sin imponer jerarquías ni puntajes para evitar sobreajuste. Todos los insumos se trabajaron a una resolución espacial de 1 ha por píxel. La información de pH proviene del Mapa de Perfiles de Suelo, Serie II (INEGI), con 298 mediciones puntuales. El modelo digital de elevación (MDE) se obtuvo del Continuo de Elevaciones Mexicano 4.0 (INEGI) y, a partir de este MDE, se derivó el mapa de pendientes (Figura 1).

Se verificaron correlación y colinealidad entre covariables. Para la bondad de ajuste de la variable respuesta y la selección de familia/enlace, se aplicaron pruebas sobre la distribución de los datos (y sus transformaciones): Shapiro–Wilk, Anderson–Darling, Cramér–von Mises, Lilliefors (normalidad) y Kolmogorov–Smirnov con bootstrap paramétrico para familias Gamma. Para pH (soporte: positivos) bajo una distribución Gamma, las pruebas de bondad de ajuste arrojaron: Anderson–Darling = 1.76 con p = 0.125 (no se rechaza H_0), Cramér–von Mises = 0.334 con p = 0.109 (no se rechaza H_0) y Kolmogorov–Smirnov = 0.0935 con p = 0.0109 (se rechaza H_0 al 5%). En conjunto, dos pruebas no rechazan el ajuste Gamma mientras que KS sí lo rechaza, por lo que el soporte empírico es mixto y sugiere cautela o contraste adicional (p. ej., KS con bootstrap paramétrico).

Red Neuronal Perceptrón Multicapa (MLP) con 12 neuronas ocultas y un parámetro de regularización de 0.01, Extreme Gradient Boosting (XGB) con 200 iteraciones, profundidad máxima de cuatro y tasa de aprendizaje de 0.05, y Red Neuronal Regularizada Bayesiana (BRNN) con siete neuronas ocultas.

En este estudio, debido al tamaño reducido de la muestra, se aplicó validación cruzada leave-one-out (LOOCV), comparando los valores observados de pH con los valores predichos por cada modelo. Para cuantificar el desempeño se calcularon las métricas estándar de ajuste predictivo: raíz del error cuadrático medio (RMSE), error absoluto medio (MAE) y coeficiente de correlación (r) entre observados y predichos, lo que permitió evaluar de manera objetiva la precisión y robustez de los modelos considerados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estado de Nuevo León cuenta con 18 topoformas (Figura 1d), siendo los lomeríos los más representativos. Las variables de elevación y pendiente tuvieron baja correlación respecto al pH, debido a la homogeneidad del material parental del suelo que es sedimentario; mientras que, los valores de VIF (1.06) indican ausencia de multicolinealidad. La distribución Gamma resultó más adecuada para modelar el pH del suelo, de acuerdo con las pruebas de bondad de ajuste (Cuadro 1).

Los modelos evaluados muestran que la influencia de las variables topográficas sobre el pH del suelo varía según el enfoque utilizado. Mientras que el modelo OLS destaca un efecto negativo de la altitud, el modelo GLM-Gamma reduce esa significancia y no detecta efecto de la pendiente. En contraste, el modelo GAM-Gamma capta relaciones más complejas, con efectos significativos de la pendiente y la topoforma, lo que lo posiciona como el modelo más adecuado para representar la influencia del relieve sobre el pH.

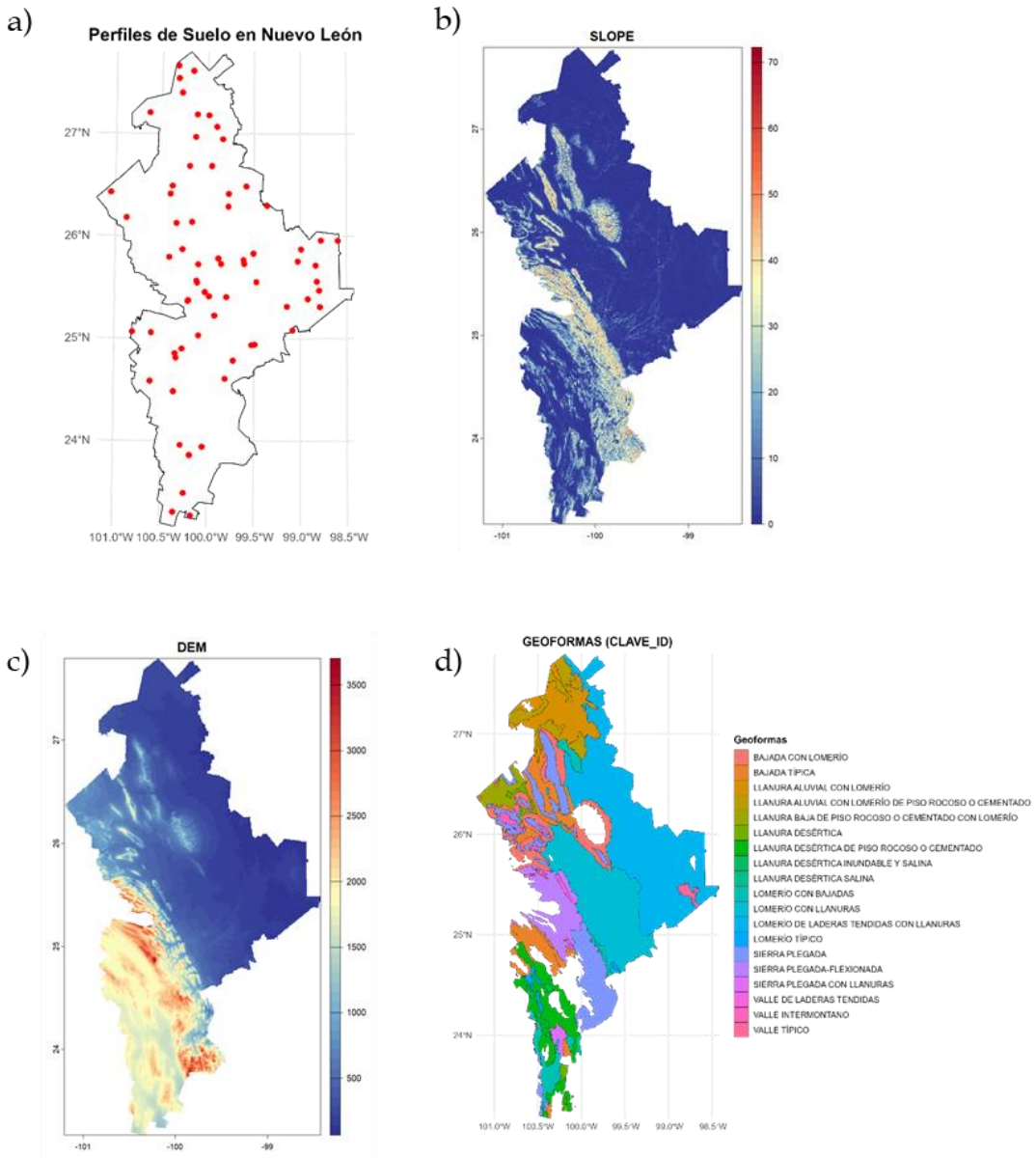


Figura 1. Mapas temáticos de a) distribución de perfiles, b) pendiente (%), c) elevación (msnm) y d) topoformas.

Cuadro 1. Comparación de coeficientes en modelos OLS, GLM y GAM.

Modelo	Parámetro	Estimate	p-valor
OLS	(Intercept)	8.388	<2.2e-16***
OLS	DEM	-0.00015	1.11e-06 ***
OLS	SLOPE	-0.0072	0.067
GLM Gamma	(Intercept)	2.121	< 2e-16 ***
GLM Gamma	DEM	-0.000011	0.0782
GLM Gamma	SLOPE	- 0.00069	0.2987
GAM-Gamma	(Intercept)	2.1099	< 2e-16 ***
GAM- Gamma	DEM	1.188	0.0614
GAM- Gamma	SLOPE	3.331	0.0334 *
GAM- Gamma	TOPOFORMA	13.252	<2e-16 ***

Nota: significancia de códigos: *** 0.001, ** 0.01, * 0.05.

El desempeño de los modelos mostró diferencias claras. El GAM-Gamma fue el más preciso en la estimación del pH del suelo. Entre los enfoques de machine learning, el modelo XGB presentó el mejor rendimiento, superando a MLP y BRNN, y coincidiendo con los resultados reportados por Natarajan *et al.* (2022). En contraste, los modelos OLS y BRNN mostraron el menor desempeño predictivo.

Cuadro 2. Métricas de predicción de los modelos.

Modelo	RMSE	MAE	Correlación
OLS	0.3579	0.2805	0.4043
Gamma	0.3066	0.2548	0.6223
GAM- Gamma	0.2545	0.1971	0.7017
MLP	0.2922	0.2264	0.5451
XGB	0.2705	0.2041	0.6356
BRNN	0.3243	0.2469	0.3610

Los resultados coinciden con estudios previos que reportan un pH alcalino en Nuevo León (Luna Robles *et al.,* 2025). Aunque altitud y pendiente contribuyen a explicar el pH, persisten interacciones complejas como: rugosidad del terreno, climatología, vegetación, y efectos de índices climáticos (humedad, variables bioclimáticas) que los modelos actuales no capturan plenamente (Jiménez *et al.,* 2025), lo que se refleja en una varianza no explicada considerable y sugiere la necesidad de enfoques más avanzados.

CONCLUSIONES

Este estudio demostró que es posible modelar el pH del suelo en condiciones de datos limitados mediante el uso de variables topográficas y enfoques estadísticos y de machine learning. Se comprobó que modelos más flexibles, como el GAM y el XGB, son capaces de capturar mejor la variabilidad espacial y no lineal del pH, en comparación con métodos tradicionales. La incorporación de información ambiental como temperatura, humedad relativa, precipitación y e índices de vegetación de libre acceso permitiría avanzar en la caracterización edáfica regional, lo que representaría una herramienta útil

para el manejo sostenible del suelo en zonas con baja densidad de muestreo, como Nuevo León.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo a Isabel Salazar García por facilitar bases de datos del modelo digital de elevación.

BIBLIOGRAFÍA

De Jesús Velázquez-Chávez, L., Chávez-Simental, J.A., Pámanes-Carrasco, G.A., Pereda-Solís, M.E., Carrillo-Parra, A. & Ortiz-Sánchez, I.A. (2023). Anthropogenic impact on the quality of water and agricultural soil in Guadiana Valley, Durango, Mexico. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 30(3), 373–386. https://doi.org/10.2478/eces-2023-0039.

Estrada-Herrera, I., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H. & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Soil quality indicators to evaluate soil fertility. *Agrociencia,* 51(8), 813–831. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952017000800813&lng=en&tlng=en.

Gaytán-Martínez, F.D., Gutiérrez-Castorena, E.V., Encinia-Uribe, V.V., Vázquez-Alvarado, R.E., Olivares Sáenz, E. & Gutiérrez-Castorena, M.D.C. (2021). Sustainability of the soil resource in intensive production with organic contributions. *Agronomy,* 12(1), 67. https://doi.org/10.3390/agronomy12010067.

Jiménez, V.M.R., Del Pino, J.S.N., Fernández-Guisuraga, J.M. & Vera, M.A.M. (2025). Prediction of some soil properties in volcanic soils using random forest modeling: A case study at Chinyero Special Nature Reserve (Tenerife, Canary Islands). *Ecological Informatics,* 86, 103054. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2025.103054.

Luna-Robles, J.A., Cantú-Silva, I., Luna-Robles, E.O. & Bejar-Pulido, S.J. (2025). Evaluación física y química de un Vertisol en dos usos de suelo en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 16(89), 4–28. https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i89.1522.

Natarajan, V.A., Kumar, M.S., Tamizhazhagan, V. & Chevdumoi, R.M. (2022). Prediction of soil pH from remote sensing data using gradient boosted regression analysis. Journal of Pharmaceutical Negative Results, 13, suplemento S06, artículo 005. http://dx.doi.org/10.47750/pnr.2022.13.S06.005.

Yu, L., Chen, Y., Sun, W. & Huang, Y. (2019). Effects of grazing exclusion on soil carbon dynamics in alpine grasslands of the Tibetan Plateau. *Geoderma,* 353, 133–143. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.036.

Zeraatpisheh, M., Ayoubi, S., Jafari, A., Tajik, S. & Finke, P. (2019). Digital mapping of soil properties using multiple machine learning in a semi-arid region, central Iran. *Geoderma,* 338, 445–452. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.006.

Zuur, A.F., Ieno, E.N., Walker, N.J. Saveliev, A.A. & Smith, G.M. (2009). Mixed effects models and extensions in ecology with R (Vol. 574, p. 574). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-87458-6.

RASGOS MICROMORFOLÓGICOS DE SUELOS EN AMBIENTES SEMIÁRIDOS Y DIFERENTES LITOLOGÍAS, LOS REYES METZONTLA, PUEBLA

Rocío Citlali Gutiérrez de la Garza[1]; Lucy N. Mora Palomino[2]; Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena[3]

[1] Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, UNAM. Avenida Universidad, No. 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, CDMX. México.
[2] Instituto de Geología, UNAM. Avenida Universidad, No. 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, CP. 04510, CDMX. México.
[3] Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados, CP. 56264. Texcoco, Estado de México., México.

Correo del autor de correspondencia: citlalikay@gmail.com

RESUMEN

En Los Reyes Metzontla, Puebla, los suelos se forman en un ambiente semiárido con gran diversidad litológica, lo que ofrece una oportunidad para comprender su edafogénesis, sobre todo en el desarrollo estructural y porosidad, esenciales para la retención y circulación de agua. El objetivo de este trabajo fue explorar los rasgos micromorfológicos y la edafogénesis de cuatro suelos desarrollados a partir de diferentes litologías y, así, entender sus propiedades relacionadas con la retención de humedad. Los resultados mostraron que los suelos desarrollados en calizas y turbiditas presentaron mayor desarrollo estructural, con agregados migajosos y poros interconectados que favorecen la retención de humedad, mientras que los derivados de granito o con fuerte aporte coluvial presentaron pedogénesis incipiente, textura arenosa y baja capacidad de almacenamiento. Además, se identificaron procesos como la formación e iluviación de carbonatos, la oxidación de minerales de Fe y la formación incipiente de agregados, cuya intensidad dependió del material parental. En general, el clima semiárido limita la edafogénesis, pero la variabilidad litológica de Los Reyes Metzontla genera contrastes en la evolución del suelo y en su capacidad para retener humedad.

PALABRAS CLAVE: *Material parental; Metzontla; Micromorfología; Semiárido.*

INTRODUCCIÓN

Las zonas semiáridas se caracterizan por presentar un balance hídrico negativo, lo que limita numerosos procesos bióticos y abióticos. En este contexto, los suelos desempeñan un papel fundamental en la retención de agua; sin embargo, dicha capacidad depende de propiedades como la textura, la materia orgánica y la estructura (Will *et al.,* 2007). La localidad de Los Reyes Metzontla, en Puebla, ha sido objeto de múltiples investigaciones geológicas, destacada por su alta diversidad litológica concentrada en un área relativamente pequeña. Por el contrario, los estudios edafológicos han sido escasos y describen a los suelos de manera general, clasificándolos principalmente como Leptosoles y Regosoles (INEGI, 2015; López-Galindo *et al*., 2003).

El régimen climático semiárido representa una restricción para los procesos pedogenéticos y limita la evolución de los suelos. No obstante, la variabilidad litológica y topográfica del área puede establecer diferentes niveles de desarrollo edáfico y, por lo tanto, distintas capacidades de almacenamiento de agua. El objetivo de este trabajo fue explorar los rasgos micromorfológicos de cuatro suelos desarrollados a partir de diferentes litologías, con el fin de comprender su pedogénesis y su influencia en la retención y almacenamiento de agua.

MATERIALES Y MÉTODOS

La comunidad de Los Reyes Metzontla se localiza en el municipio de Zapotitlán Salinas, al sur del estado de Puebla, México. El área de estudio se sitúa en el límite de dos provincias fisiográficas: la Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico, lo que le confiere una notable diversidad litológica y un relieve accidentado (Centeno-García *et al*., 2009). El clima predominante corresponde al tipo Bs (semiárido), caracterizado por una baja precipitación anual y una alta evapotranspiración (García, 2004).

La selección de los sitios de muestreo se realizó con el propósito de representar el contraste litológico característico de la zona. Fueron considerados cuatro materiales parentales: caliza masiva, aluvión volcánico, granito y aluvión de turbiditas.

En cada sitio fue descrito un perfil de suelo con base en el Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos (Siebe *et al*., 2016), y los perfiles fueron clasificados de acuerdo con la IUSS Grupo de Trabajo de la WRB (2022). Durante el trabajo de campo fueron registrados atributos morfológicos de los horizontes, como profundidad, textura, estructura y porosidad. En laboratorio se determinó el volumen de tipo de poros y su relación con la retención de humedad. Asimismo, de los horizontes superficiales fueron recolectadas muestras para la elaboración de láminas delgadas (LD) (Murphy, 1986). Después, las LD se describieron con un microscopio petrográfico bajo distintos tipos de luz, lo que permitió identificar rasgos micromorfológicos y procesos pedogenéticos. La interpretación sobre la edafogénesis se basó en Stoops *et al.* (2018).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sobre la caliza masiva se describió un Leptosol. El perfil presentó un horizonte A de color oscuro con abundante materia orgánica y un horizonte AC con presencia de carbonato primario (Figura 1f). En las láminas delgadas de ambos horizontes se observó un material de grano fino y opaco. En el horizonte A, la concentración de hematita (Hem) y goethita (Ght) da a la masa basal tiene tonalidad rojiza-amarillenta intensa. La microestructura es apedal de microagregados entre granos, lo que indica una edafogénesis incipiente (Weil *et al.,* 2017).

En el horizonte AC se conservan parcialmente las estructuras originales de los granos minerales, reemplazados por óxidos de hierro derivados probablemente de magnetita alterada y posteriormente diseminada (Figura 1c-e). Asimismo, se observa el movimiento del material secundario de óxidos diseminándose entre estos granos minerales reemplazados (Figura 1c-e). Estas propiedades evidencian procesos de intemperismo

(disolución) e iluviación de óxidos de Fe, que recubren los granos y limitan la alteración de la caliza a profundidad (Stoops *et al.* 2018).

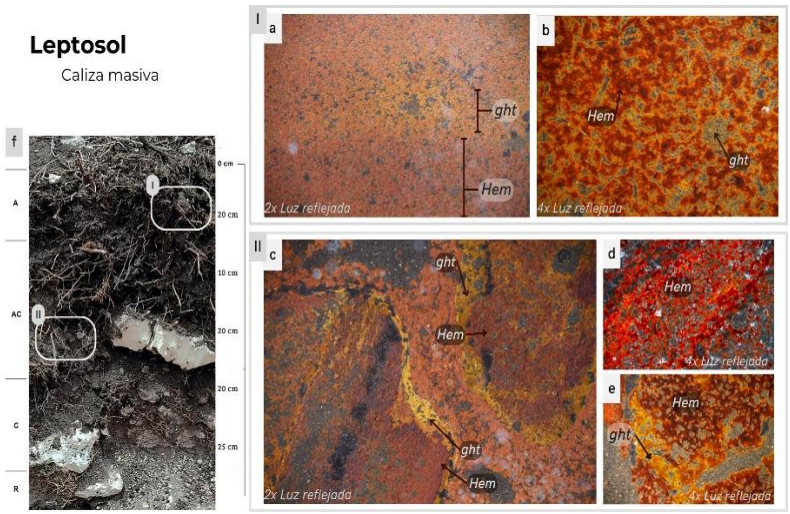


Figura 1. Perfil de suelo y microfotografías de láminas delgadas de Leptosol desarrollado sobre caliza masiva en Los Reyes Metzontla. (a–b) Horizonte A. (c–e) Horizonte AC. (f) Fotografía del perfil de suelo con ubicación de las muestras. Abreviaciones: Hematita (Hem), Goethita (Ght).

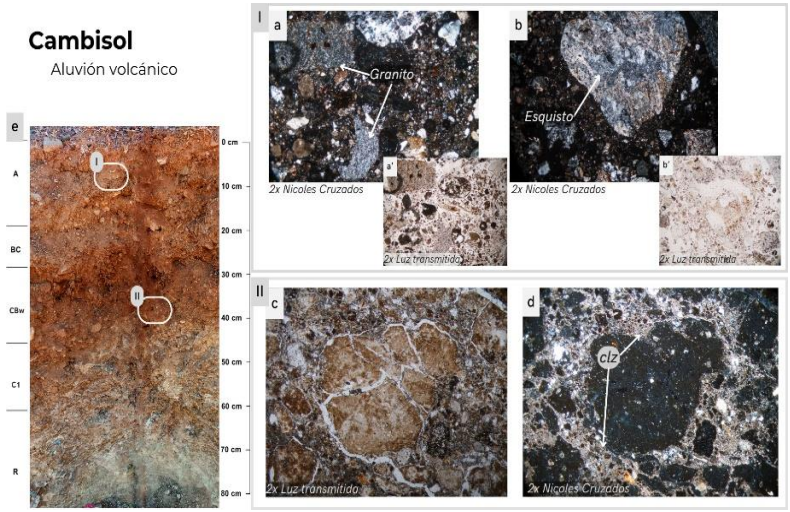


Figura 2. Perfil de suelo y microfotografías de láminas delgadas de Cambisol desarrollado sobre material aluvial volcánico en Los Reyes Metzontla. (a–b) Horizonte A. (c–d) Láminas del horizonte CBw (e) Fotografía del perfil de suelo con ubicación de las muestras. Abreviaciones: Carbonato secundario (clz)

Sobre los sedimentos aluviales de origen volcánico se describió un Cambisol (Figura 2). Las LD del horizonte Ah muestran una textura arenosa y un bajo contenido de rasgos calcáreos. Por otra parte, el horizonte CBw presenta una mayor proporción de limo y la presencia de carbonatos primarios. En el Ah se observaron agregados migajosos entre

granos y abundancia de fragmentos líticos de distintas litologías, como granito y esquisto, reflejo de aportes coluviales. En contraste, el CBw presentó bloques subangulares formados principalmente por material volcánico y rodeados por revestimientos y rellenos calcíticos, evidencias de iluviación (Figura 2c-d). La formación incipiente del horizonte CBw se puede relacionar con una mayor retención de humedad con respecto al horizonte superficial, debido a la presencia de un sistema poroso heterogéneo (Weil y Brady, 2017).

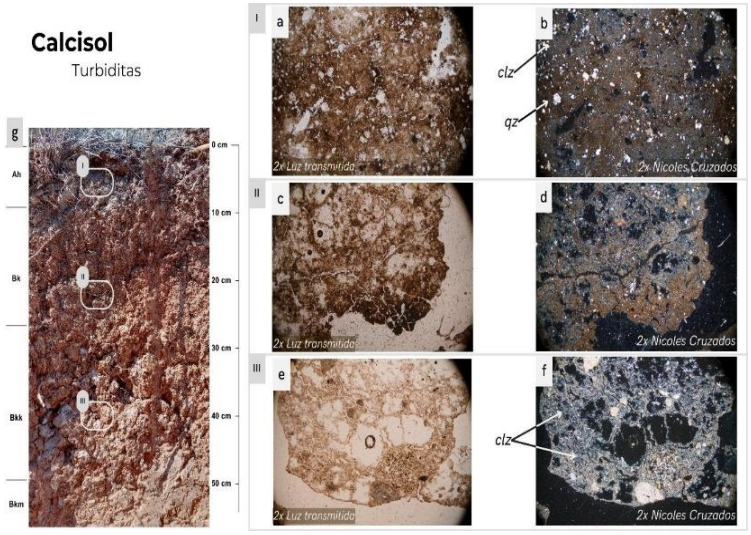


Figura 3. Perfil de suelo y microfotografías de láminas delgadas de Calcisol desarrollado sobre turbiditas. (a–b) Láminas del horizonte Ah. (c–d) Horizonte Bk. (e–f) Horizonte Bkk. (g) Fotografía del perfil de suelo con ubicación de las muestras. Abreviaciones: Cuarzo (qz), Carbonato secundario (clz)

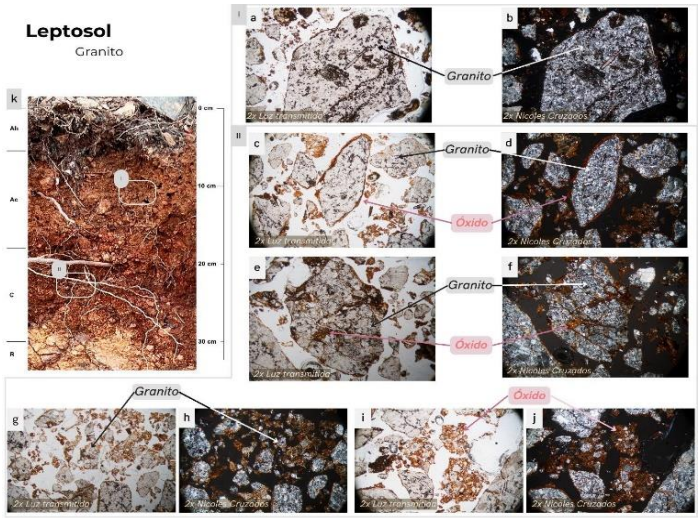


Figura 4. Perfil de suelo y microfotografías de láminas delgadas del Leptosol desarrollado sobre granito. (a–b) Horizonte AC. (c–j) Horizonte C. (k) Fotografía del perfil de suelo con ubicación de las muestras.

Sobre el aluvión de turbiditas se describió un Calcisol, del cual se obtuvieron LD de los horizontes Ah, Bk y Bkk (Figura 3g). Este suelo se caracterizó por un alto contenido de carbonato de calcio y por una textura arcillo-limosa. En conjunto, las tres láminas mostraron bloques subangulares. La distribución de estos varió conforme a la profundidad: los de mayor tamaño se encontraron en los horizontes más superficiales. Paralelamente, se observó un aumento progresivo de carbonato secundario en los horizontes más profundos. De la misma forma, junto con la profundidad se incrementó la porosidad interconectada, lo que sugiere una evolución estructural más avanzada de este suelo respecto a los otros (Figura 3e-f). Estas características reflejan una mayor capacidad de retención de agua, favorecida por la combinación de carbonatos y una matriz fina que sostiene la estructura (Stoops *et al.,* 2018).

Sobre el cuerpo granítico se describió un Leptosol (Figura 4), caracterizado por su coloración rojiza, alta pedregosidad y textura arenosa. Las LD de los horizontes AC y C mostraron un bajo desarrollo edáfico, predominando granos minerales derivados directamente del granito. En ambas muestras se reconocieron procesos de intemperismo y oxidación sobre los granos líticos (Figura 4a-j). El material secundario, producto de la oxidación, recubrió estas fracciones finas, contribuyendo a su estabilización y a la formación de pequeños agregados. Estas características muestran un suelo joven, con baja retención de agua por su pedogénesis incipiente y un drenaje rápido debido a su textura arenosa y escaso desarrollo estructural (Weil y Brady, 2017).

CONCLUSIONES

En general, los suelos de Los Reyes Metzontla tienen una edafogénesis incipiente, limitada por el clima semiárido, lo que se refleja en la presencia de rasgos calcíticos, estructuras apedales y poca profundidad.

En el análisis micromorfológico se pudieron identificar procesos como la oxidación de Fe, la formación e iluviación de carbonatos y la formación incipiente de agregados; rasgos que no fueron perceptibles a escala macromorfológica. La presencia e intensidad de estos procesos dependieron del material parental, que definió la pedogénesis (estructura y porosidad).

Los suelos formados a partir de calizas y turbiditas presentaron un mayor desarrollo estructural y, por consiguiente, mayor porosidad y capacidad de almacenamiento de agua. En contraste, los suelos derivados del granito o con fuerte aporte coluvial reciente mostraron menor evolución y capacidad de retención hídrica.

BIBLIOGRAFÍA

Centeno-García, E., Mendoza-Rosales, C. & Silva-Romo, G. (2009). Sedimentología de la Formación Matzitzi (Paleozoico superior) y significado de sus componentes volcánicos, región de Los Reyes Metzontla-San Luis Atolotitlán, Estado de Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas,* 26(1), 18–36. https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2009.1.28

García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México.

INEGI. (2015). Conjunto de datos vectorial edafológico, escala 1:250 000, Serie II continuo nacional Orizaba. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Viena, Austria.

López-Galindo, F., Muñoz-Iniestra, D., Hernández-Moreno, M., Soler-Aburto, A., Castillo-López, M.C. & Hernández-Arzate, I. (2003). Análisis integral de la toposecuencia y su influencia en la distribución de la vegetación y la degradación del suelo en la Subcuenca de Zapotitlán Salinas, Puebla. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1), 19–41. http://www.jstor.org/stable/24920375

Murphy, C.P. (1986). Thin Section Preparation of Soils and Sediments. Berkhamsted: A.B. Academic. 149 p. ISBN 0907360041, 9780907360049.

Siebe, C., Jahn, R. & Stahr, K. (2016). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en campo (3.a ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.

Stoops, G., Marcelino, V. & Mees, F. (Eds.). (2018). Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths (2ª ed.). Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2016-0-04200-4

Weil, R.R. & Brady, N.C. (2017). The nature and properties of soils (Vol. 1104). London, UK: Pearson.

El Suelo: Pasado, Presente y Futuro de la Vida

División II. Propiedades del Suelo y Procesos

LOS COLÉMBOLOS DE SUELOS AGRÍCOLAS, ¿QUÉ NOS DICEN DE LA SALUD DEL SUELO?

José G. Palacios Vargas[1]; Angela Arango Galván[1]; Margarita Ojeda[1]

[1] Laboratorio de Ecología y Sistemática de Microartrópodos, Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, 04510, CDMX, México.

Correo del autor de correspondencia: margojeda@gmail.com

RESUMEN

Los colémbolos ayudan a los procesos de descomposición e incorporación de la materia orgánica del suelo, en particular, en los suelos de usos agrícolas en todo el mundo. En México, diversos cultivos son relevantes en la alimentación, entre ellos el maíz, trigo y la caña de azúcar. Morelos es uno de los estados con una alta producción de caña en general, pero los estudios de la fauna edáfica y su relación con los sistemas agrícolas es escasa. En el presente estudio se caracteriza la comunidad de Collembola y se analiza su diversidad y abundancia en los cultivos de caña, para entender su respuesta a los procesos de labranza y proponer su uso como indicadores de la salud del suelo. Para ello se llevó a cabo un muestreo de suelo del cultivo de caña de azúcar en la temporada seca, en una zona del Municipio de Ayala, Morelos. Las muestras fueron extraídas con nucleadores a dos profundidades, procesadas mediante embudos de Berlese. Los organismos obtenidos fueron separados, cuantificados e identificados a nivel específico. Se obtuvieron un total de ocho familias y 22 especies de Collembola, entre las que destacan *Folsomides parvulus, Mesaphorura yoshiii, Lepidocyrtus* sp., especies bien distribuidas en las parcelas estudiadas, habitando tanto en la capa superficial como a la profundidad de 5-10 cm. Su presencia en este cultivo servirá para determinar su utilidad como un indicador de las condiciones edáficas.

PALABRAS CLAVE: *Edáficos; fertilidad; microartrópodos; uso del suelo.*

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural no renovable, cuya pérdida y degradación son irreversibles en escala de tiempo humana; es esencial y cumple funciones vitales como soporte para la vida vegetal, regulación del ciclo hidrológico, además de ser hábitat para diversos organismos. Su uso es fundamental para la producción de alimentos, el desarrollo urbano y la calidad ambiental.

Los colémbolos son un grupo de "microartrópodos", término utilizado para describir a los artrópodos según su talla, que viven en los sistemas suelo-hojarasca y ayudan a regular muchos procesos de la descomposición mediante su alimentación y otros comportamientos (Moore *et al*., 1988). Un aspecto que vincula a los microartrópodos en todo el mundo es que pertenecen a grupos taxonómicos poco conocidos, como los colémbolos, ácaros, proturos, dipluros, paurópodos, sínfilos, los pseudoescorpiones, miriápodos más pequeños, arañas e insectos, especialmente escarabajos, hormigas,

avispas parasitoides y moscas. Pocas zonas del mundo cuentan con la infraestructura taxonómica necesaria (especialistas) para abordar su estudio a nivel de especie, siendo México, uno de los pocos sitios en donde existen expertos en estos grupos que viven en el suelo. Es así como se han llevado a cabo diversos estudios de colémbolos de cultivos de maíz con adición de biosólidos (Flores-Pardavé *et al*., 2011), y de cultivos de maíz en suelos con distinto tipo de irrigación (Cutz-Pool *et al*., 2007), entre otros estudios, pero ninguno del cultivo de la caña. La única investigación que se ha realizado con dicho cultivo fue en colaboración con la Universidad de Cuba (González *et al*., 1997).

Del estado de Morelos se han citado un total de 151 especies de colémbolos agrupadas en 62 géneros de 16 familias, algunas de ellas endémicas del estado (Palacios-Vargas y Cruz-Leal, 2020); sin embargo, la mayoría de las investigaciones de estos microartrópodos son principalmente de ambientes naturales y muy pocas de cultivos.

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es la planta que se utiliza para la producción de azúcar en México; mide de 2 a 6 m de altura con tallos robustos, articulados y fibrosos ricos en sacarosa. La mayor parte de las investigaciones se han centrado en la biología y el control de plagas relativamente grandes que se alimentan de raíces, como las larvas de coleópteros (larvas de la caña) y las moscas soldado (dípteros de la familia Stratiomyidae), en algunas plagas más pequeñas, los sínfilos, y colémbolos (Asif *et al*., 2016; Shakir y Ahmed, 2015; Sajjad *et al*., 2012; Allsopp *et al*., 1993).

La caña de azúcar se cultiva comúnmente en México mediante sistemas de labranza convencionales. Uno de los estados productores es Morelos, el 8.º productor nacional con cerca de 2 millones de toneladas según el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2019). La zafra (periodo en el que se cosechan los campos de caña de azúcar para su procesamiento en los ingenios) se lleva a cabo a finales del mes de noviembre y termina en mayo del siguiente año, siendo febrero el mes de mayor producción. Los municipios que registran las mayores superficies plantadas de caña de azúcar son: Tlaltizapán, Tlaquiltenango, Jojutla, Ayala y Cuautla. Sin embargo, este sistema produce altos niveles de compactación del suelo debido a la cosecha mecánica y el transporte utilizado durante el proceso de producción.

Diversos taxones de artrópodos del suelo pueden utilizarse como indicadores para evaluar el impacto de los diferentes usos del suelo (Menta *et al*., 2018) y también pueden utilizarse para identificar prácticas agrícolas menos dañinas para el medio ambiente.

El objetivo de este trabajo, es presentar los resultados que muestran que los suelos de caña de azúcar contienen una comunidad diversa de microartrópodos, y en especial de colémbolos con el potencial de ser utilizados como un indicador de la salud del cultivo, con el conocimiento de su papel en el ciclo de nutrientes y la regulación de las poblaciones de plagas y patógenos asociados.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en cuatro parcelas ubicadas en Ayala, Morelos, con una superficie de 3,000 m² (18°45’38” N, 98°58’1” O) y una altitud de 1,210 msnm. La colecta reportada en el presente trabajo se realizó en marzo de 2025, en la época de sequía. Se seleccionó un área de un acre para cada cultivo y se dividió en cuatro parcelas iguales. El

muestreo se realizó al azar tomando una línea de 100 m en donde cada siete se tomó una muestra, la primera de 0 a 5 cm; y la segunda de 5 a 10 cm de profundidad. Para ello se utilizaron nucleadores de 88 cm^2; cada muestra fue colocada en un contenedor para su transporte al laboratorio. En total se tomaron 56 muestras que fueron procesadas mediante el método de Embudos de Berlese-Tullgren durante seis días, los tres primeros a temperatura ambiente y el resto con una fuente de luz de 40 watts. Los frascos colectores contenían etanol al 70%. Los colémbolos de los muestreos en cada parcela se identificaron hasta el nivel de especie mediante el uso de diversas claves taxonómicas. También se determinaron los factores abióticos, como la temperatura, la humedad relativa y el CO_2, utilizando un multimedidor (IAQ-CALC8760-M-NP).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del muestreo en las tres parcelas con cultivo de caña y una parcela control sin cultivo (por varios años), se obtuvieron un total de ocho familias y 22 especies. Isotomidae representada con el mayor número de especies presentes en las tres parcelas en ambas profundidades de 0 a 5 y de 5 a 10 cm, entre las que destaca por su abundancia *Folsomides parvulus* (20%) (Figura 1). Esta familia tiene hábitos hemiedáficos y por lo general son abundantes en diversos ambientes. El género *Lepidocyrtus* perteneciente a la familia Entomobryidae fue también abundante (17.5%). Dos familias, Dicyrtomidae (*Calvatomina* sp.) y Onychiuridae (*Onychiurus* s.l.), solo estuvieron presentes en una parcela, la primera en una profundidad de 5-10 cm y la segunda en la capa más superficial (0-5) con una abundancia relativa menor al 2%. *Mesaphorura yoshii* un Tullbergiidae asociado con suelos de diversos cultivos, se encontró en las tres parcelas en las dos profundidades estudiadas. Por su parte, *Ceratophysella armata* está en las parcelas 1 y 2, en la capa de 0-5 cm. Finalmente, el Entomobryidae, *Lepidocyrtus* sp., se colectó de las parcelas 1 y 2 en ambas profundidades. Se ha reportado que los colémbolos de este último género son especies agresivas y eventualmente, pueden ser perjudiciales para los cultivos (Ingram, 1931).

Los colémbolos que se registraron con mayor abundancia en los cultivos de caña de Morelos durante la época de sequía fueron los pertenecientes a las familias Isotomidae y Tullbergidae, los cuales son hemiedáficos y euedáficos respectivamente, esta característica dentro de muchas otras, permiten que puedan aportar mediante su presencia y abundancia, información específica acerca de las condiciones del suelo en ese periodo en particular, el hecho de no encontrarse en la superficie sino en una profundidad mayor nos habla de una estrategia utilizada por estos organismos para poder sobrevivir a condiciones de temperatura y humedad extremas asociadas a la sequía.

Al comparar lo obtenido con el estudio realizado en Cuba por González *et al.* (1997) se nota que hay una mayor diversidad de colémbolos en el cultivo de la caña de ese país, 37 especies mientras que en el mismo tipo de cultivo de Morelos sólo se han encontrado 22 especies en la época de sequía.

Por otro lado, al contrastar los resultados de este trabajo, con los obtenidos en los cultivos de caña de Cuba, se observa que comparten varios géneros, sin embargo, las especies son distintas. La especie *Folsomides parvulus*, presentó la mayor abundancia en una de las parcelas, esta especie presenta una alta sensibilidad a los cambios sutiles en la

calidad del suelo, contribuye al ciclo de nutrientes y a la formación de suelo fértil, su presencia en estos agroecosistemas contribuye a la evaluación de efectos contaminantes por ejemplo de pesticidas.

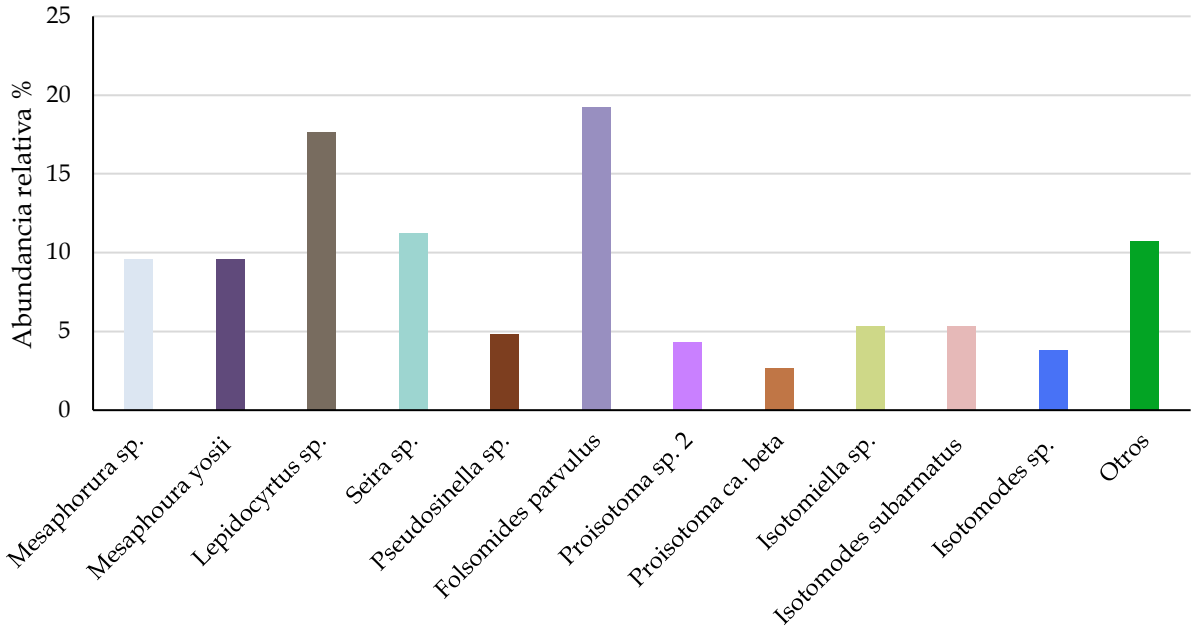


Figura 1. Abundancia relativa de los géneros y especies de colémbolos de los cultivos de caña de Morelos en temporada de sequía.

CONCLUSIONES

A través de los resultados obtenidos en este estudio y tomando en cuenta la sensibilidad que presentan algunas especies de Collembola, podemos decir que, el estudio de los colémbolos en las parcelas de cultivo de caña en Morelos revela una diversidad notable con la identificación de ocho familias y 22 especies, destacando la familia Isotomidae y el género *Lepidocyrtus*. A pesar de la menor diversidad en comparación con Cuba, la presencia de especies como *Folsomides parvulus* y su sensibilidad a la calidad del suelo resalta la importancia ecológica de los colémbolos en estos agroecosistemas.

Estos organismos no solo son indicadores de las condiciones del suelo durante la sequía, sino que también desempeñan un papel crucial en el ciclo de nutrientes y en la evaluación de impactos ambientales, como el uso de pesticidas. La investigación sugiere la necesidad de un seguimiento continuo de la biodiversidad del suelo para comprender mejor la salud de los cultivos y la sostenibilidad de los agroecosistemas en la región. Asimismo, es necesario conocer de manera específica a los colémbolos de las distintas zonas donde se desarrollan los cañaverales, para poder estimar y determinar su uso como bioindicadores edáficos y así poder dar alternativas para un mejor aprovechamiento del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Dirección General de Asuntos del del Personal Académico de la UNAM, a través del proyecto PAPIIT IN220725: "INDICADORES BIOLÓGICOS DE LA SALUD DEL SUELO: EL IMPACTO DE LA COMUNIDAD DE MICROARTRÓPODOS EN LOS CULTIVOS MORELENSES", así como a la comunidad de cañeros de Ciudad Ayala, en particular al maestro Gilberto Varo de la Rosa, así como a los profesores del taller Ecología de Microartrópodos la Facultad de Ciencias, Maira Montejo Cruz, Leonardo García Ayala y Fernando Villagomez y a los alumnos que participaron en el muestreo.

BIBLIOGRAFÍA

Allsopp, P. G., Chandler, K.J., Samson, P.R. & Story, P.G. (1993). Pests of Australian sugarcane. Bureau of Sugar Experiment Stations: Brisbane.

Asif, M.U., Ahmed, S., Khan R.R. & Atiq, M. (2016). Relationship of Collembola population with different abiotic factors in an agricultural ecosystem of Faisalabad, Punjab, Pakistan. Pak. *J. Agri. Sci*., 53: 201-208. doi:10.21162/PAKJAS/16.4179

Cutz-Pool, L. Q., Palacios-Vargas, J.G., Castaño-Meneses, G. & García-Calderón, N.E. (2007). Edaphic Collembola from two agroecosystems with contrasting irrigation type in Hidalgo State, Mexico. *Appl. Soil Ecol.,* 36:46-52.

Flores-Pardavé, L., Palacios-Vargas, J.G., Castaño–Meneses, G. & Cutz-Pool, L.Q. (2011). Colémbolos de suelos agrícolas en cultivos de alfalfa y de maíz adicionados con biosólidos en Aguascalientes, México. *Agrociencia*, 45(3): 353-362.

González, V., Díaz, M. & Palacios-Vargas, J.G. (1997). Los colémbolos asociados al cultivo de la caña de azúcar. *Bol. Soc. Mex. Entomol.,* 15:43-49.

Menta, C. F.D., Conti, F.D., Pinto, S. & Bodin, A. (2018). Soil Biological Quality Index (QBS-ar): 15 years of application at global scale. *Ecol. Indicat.,* 85:773-780

Moore J.C., Walter, D.E. & Hunt, H.W. (1988). Arthropod regulation of micro- and mesobiota in belowground detrital food webs. *Ann. Rev. Entomol.,* 33: 419-439. doi:10.1146/annurev.en.33.010188.002223

Palacios-Vargas, J. G. & Cruz-Leal, J.I. (2020). Colémbolos (Collembola: Hexapoda). En: La biodiversidad en Morelos. Estudio de Estado 2, Vol. II: 85-91.

Sajjad, A., Ahmad, F., Makhdoom, A.H., & Imran, A. (2012). Does trash burning harm arthropod biodiversity in sugarcane? Int. *J. Agric. Biol.,* 14:1021-1023.

Shakir, M.M. & Ahmed, S. (2015). Seasonal abundance of soil arthropods in relation to meteorological and edaphic factors in the agroecosystems of Faisalabad, Punjab, Pakistan. *Int. J. Biometeorol.,* 59: 605-616. doi:10.1007/s00484-014-0874-9

SIAP. 2019. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://www.gob.mx/agricultura/morelos.

AISLAMIENTO DE BACTERIAS DEGRADADORAS DE LIGNINA DE SUELO RIZOSFÉRICO DE *Quercus* spp.

Iván Hernández Portillo[1]; Yadira Cornejo Silva[1]; Yolanda Ríos Gómez[2]; Ramiro Ríos Gómez[1]

1 Facultad de Estudios Superiores Zaragoza UNAM, C.P. 90640, San Miguel Contla, México.
2 Universidad Autónoma del Estado de Morelos, C.P. 62209, Chamilpa, Cuernavaca, México.

Correo del autor de correspondencia: riosarana44@gmail.com

RESUMEN

La lignina constituye uno de los principales componentes del carbono orgánico del suelo; sin embargo, su biodegradación y transformación dentro del mismo permanecen poco caracterizadas. Estudios recientes han permitido visibilizar el papel de ciertos microorganismos en este proceso. Este trabajo se centró en el estudio exploratorio de las comunidades bacterianas rizosféricas de *Quercus* spp. cultivables, capaces de degradar la lignina, en medios de cultivo adicionados con lignina extraída de raíces de *Quercus* nativas del ecosistema y lignina Kraft comercial. Se comprobó mediante análisis espectrofotométricos UV–Vis y RMN que la lignina extraída del ecosistema presenta una mayor proporción de enlaces β-O-4 y grupos fenólicos libres, lo que favorece la degradación, sin embargo, la presencia de señales relacionadas a enlaces con hemicelulosa indica dificultades en el acoplamiento enzimático. Los cultivos selectivos permitieron identificar 23 aislamientos bacterianos y 9 para actinomicetos, con actividad ligninolítica, comprobada a través de pruebas de degradación con azul anilina. Los resultados muestran que la lignina Organosolv favorece el crecimiento de una comunidad microbiana complementaria a la de la lignina Kraft comercial, además de que facilita el aislamiento de cepas con potencial biotecnológico. Estos hallazgos aportan conocimiento esencial sobre las interacciones entre lignina y bacterias del suelo.

PALABRAS CLAVE: *Actinomicetos; espectrofotometría; Kraft; medios selectivos; Organosolv.*

INTRODUCCIÓN

La lignina es la fuente principal de compuestos aromáticos en la biosfera, además del segundo biopolímero más abundante en las plantas (Yaovapa *et al.,* 2005). Su estructura compleja y propiedades recalcitrantes, limitan su biodegradación e incorporación al suelo y constituyen uno de los procesos ecológicos más complejos en la biosfera (Ortiz, 2009; Montoya y Muñoz, 2014). Pese a que los hongos basidiomicetos son reconocidos como los principales degradadores de lignina. Existen informes de bacterias ligninolíticas que poseen mecanismos de enzimas extracelulares y metabolitos secundarios capaces de actuar sobre este polímero, en particular las clases: α-Proteobacteria, γ-Proteobacteria y Actinomicetos, son consideradas los principales descomponedores de lignocelulosas en el suelo (´Saini *et al.,* 2015; Huang *et al.,* 2013).

Este trabajo explora el reservorio de diversidad bacteriana ligninolítica en la rizosfera de especies de *Quercus* spp. con el fin de aislar y describir morfológicamente cepas bacterianas degradadoras de lignina además de adecuar métodos de extracción de este biopolímero biológicamente activo. Así mismo, poder comparar la eficiencia selectiva de la lignina nativa contra la comercial como fuentes de carbono en medios de cultivo, se planteó la siguiente hipótesis: El adecuar medios de cultivo con lignina nativa del bosque de *Quercus* se promueve una mayor representatividad de las comunidades bacterianas ligninolíticas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras utilizadas fueron recolectadas en Santiago Tilantongo, Oaxaca, en la RTP 125 Cerros Negro-Yucaño, localizada al noreste del estado de Oaxaca, con una extensión de 1,274 km^2 y una altitud entre 1,300 y 3,200 msnm, con clima predominante templado (Cw1) y grandes extensiones de bosques conservados, mayoritariamente de *Quercus*, *Pinnus* y bosques mixtos. Región que destaca por su importancia ecológica y social al conservar la biodiversidad y brindar soporte económico a las comunidades rurales.

Esta investigación se realizó en tres fases metodológicas: 1) La extracción y elucidación estructural de la lignina radical de *Quercus* spp.; 2) El aislamiento y descripción de cepas; y 3) La evaluación de la eficiencia de los medios de cultivo selectivos. Los muestreos, tanto para la extracción de lignina como para el cultivo de microorganismos, se realizaron en dos sitios, escogiendo 3 individuos sanos por sitio con DAP de 40-70 cm y altura de 10-20 m, ubicados en las coordenadas: Sitio 1 (17°23´08´´ N 97°34´46´´ O, a 2,400 msnm) y Sitio 2 (17°24´94´´N 97°34´69´´O, a 2,809 msnm).

Para los muestreos de extracción de lignina se utilizaron 50 g de tejido radical colectado a 2 m de distancia de la base de cada árbol y a una profundidad de 10-30 cm de la superficie del suelo. Las muestras se procesaron de acuerdo con García (2019) y Xu *et al.* (2006) para la extracción de lignina Organosolv. Tras el aislamiento de este polímero se procedió a comprobar y describir su estructura usando técnicas físicas no destructivas; espectrofotometría UV-Vis (espectrofotómetro DLAB modelo SP-Uv100, con lecturas de 200-500 nm), espectrofotometría RNM (Equipo RMN Jeol de 600 MHz a 600 MHz para RMN de 1H, DEPTQ, HSQC y HMBC).

Para el muestreo de microrganismos, a 2 m de la base de cada árbol y de 10-50 cm de profundidad, se recogieron 100 g entre raíces absorbentes y suelo rizosférico. Con ellos, se prepararon diluciones seriadas hasta 10^{-7} (Muratova *et al.*, 2003). Utilizando medio líquido MSM, se realizaron 3 líneas de cultivo correspondientes a: MSM adicionado con lignina Organosolv (MSM-LO), MSM adicionado con lignina Kraft comercial de grado reactivo de la marca Sigma-Aldrich (MSM-LC) y el MSM control sin adición de fuentes de carbono (MSM-C). Para las tres líneas de cultivo se realizó el siguiente esquema: a) cultivo en los medios líquidos incubados durante 7 días a 37 °C con agitación constante en las primeras 48 h, b) cultivo por rastrilleo en medio sólido incubado a 30 °C durante 48 h iniciando cultivos simultáneos en Agar nutritivo, c) selección de cepas de este último medio, para ser resembradas hasta su purificación en MSM-LC y Agar nutritivo.

Para visualizar el crecimiento entre los dos medios sólidos se realizó el conteo de

colonias 48 h después del enriquecimiento con medio líquido utilizando el software IMAGE J.

Para los experimentos de degradación, se seleccionaron los aislamientos bacterianos que tuvieron un crecimiento rápido y abundante en las placas de MSM-LC, los cuales se realizaron en medios líquidos MSM-LC y MSM-LO adicionados con 0.125 $mg \cdot mL^{-1}$ de azul anilina. Midiendo la degradación del indicador por espectrofotometría UV-Vis, del medio sin inocular y después de 7 días de incubación a 30 °C con agitaciones diarias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La extracción y caracterización de la lignina Organosolv a partir de raíces de *Quercus* spp. reveló diferencias estructurales frente a la lignina Kraft comercial, mostrando en el espectro UV-Vis, un desplazamiento del pico máximo de 283 nm a 265 nm, indicado en diversos registros como una mayor proporción de unidades guaiacil-siringilo (Sun y Tomkinson 2001, Zhang *et al.,* 2010) (Figura 1). Mientras que en los espectros RMN se observa una mayor diversidad de cadena lateral en los datos correspondientes a lignina Organosolv, con respecto a una mayor diversidad de señales de subunidades en la lignina comercial.

En particular, las señales de enlaces β-O-4 tuvieron mayor presencia en lignina Organosolv que en lignina Kraft, lo que concuerda con los registros de abundancia en maderas duras y la ausencia en herbáceas (Katahira *et al.,* 2018), este último grupo señalado como posible fuente del material de origen de la lignina comercial.

Además, se observó una mayor diversidad de benzaldehídos en la lignina Kraft comercial, así como la presencia de algunas señales aisladas de grupos fenilcumarato. En contraste, en la lignina Organosolv fueron registradas señales de resinol y fenilcumarato, lo anterior sugiere una mayor disposición de degradación en la lignina Kraft (Heitner *et al.,* 2016).

Por último, se registró la presencia de fragmentos xilanos en la lignina Organosolv relacionados con complejos lignina carbohidrato, cuya fuerte unión reduce la accesibilidad enzimática (Tarasov *et al.,* 2018; Nhuchhen *et al.,* 2014).

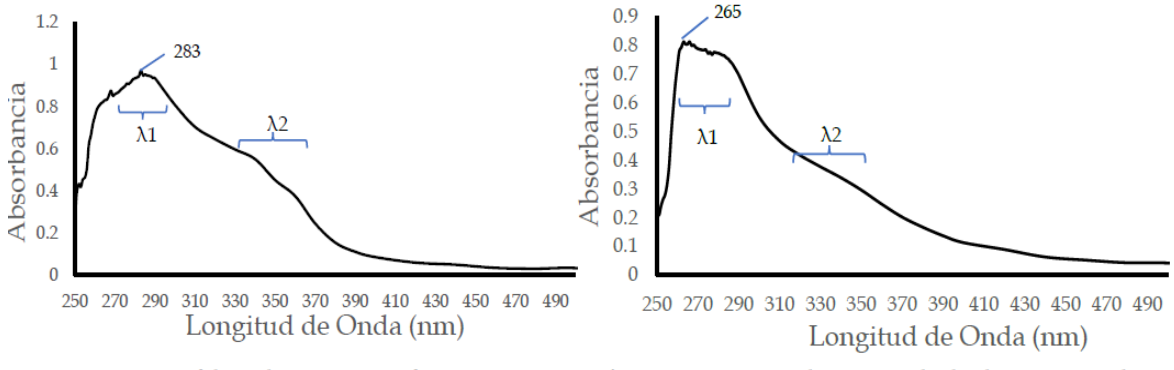


Figura 1. Perfiles de espectrofotometría UV-Vis correspondientes: de lado izquierdo Lignina Kraft comercial, lado derecho Lignina nativa Organosolv.

El conteo de colonias de los medios sólidos, antes de su asilamiento y purificación,

indicó mayor proporción en la línea MSM-LO (45.67%), seguida por la línea MSM-C (31.9%) y la MSM-LC (22.42%). Sin embargo, existieron diferencias notables en la forma y dinámica de las colonias obtenidas en las líneas MSM-LC y MSM-C, se observaron colonias grandes e irregulares con un crecimiento empalmado, indicador de medios con alta disponibilidad de nutrimentos que favorecen el crecimiento de especies copiotróficas (Prescott *et al.,* 2005). En contraste, la línea MSM-LO presentó numerosas colonias individuales y puntiformes, congruentes con el crecimiento de especies oligotróficas en medios selectivos e indicativas de un crecimiento lento con limitaciones nutrimentales o la adaptación de condiciones específicas (Madigan *et al.,* 2022). Así, se optó por descartar el uso de UFC.

Se obtuvieron un total de 54 aislamientos purificados, los cuales fueron descritos morfológicamente, incluyendo pruebas químicas básicas y tinciones. Del total, 42 aislamientos reportaron un crecimiento positivo durante las primeras 48 h de incubación en medios diferenciales. Las proporciones por línea de cultivo fueron las siguientes: MSM-C 66.7% (28 aislamientos), MSM-LO 16.67% (7 aislamientos) y MSM-LO 16.67% (7 aislamientos). Para las pruebas de degradación fueron seleccionados 8 aislamientos con características correspondientes a actinomicetos, de origen en la línea MSM-LO, 15 aislamientos con características de bacterias, de los cuales 4 correspondieron a la línea MSM-LC y 11 a la línea MSM-C.

Los resultados en las pruebas de degradación del colorante azul anilina fueron normalizados para obtener un porcentaje de cambio absoluto, con el fin de agrupar y comparar los datos obtenidos. Los aislamientos bacterianos de las líneas MSM-LC y MSM-C presentaron en ambos casos un rango menos variable en la degradación de lignina Organosolv, observado como cajas más compactas en el bloxplot (Figura 2), sugiriendo una mayor consistencia en sus dinámicas de degradación, caso contrario en los datos de degradación de Lignina Kraft comercial en los cuales se observa una mayor dispersión en los datos.

Los aislamientos de Actinomicetos, reportaron cambios bruscos en el colorante , lo que dificultó su comparación, se observó una mayor dispersión de los datos para la degradación de lignina Organosolv, con algunos aislamientos con porcentajes de cambio demasiado elevados, mientras que, para la degradación de Lignina Kraft comercial, un alto porcentaje mostro mayor afinidad al ser cultivados previamente en medios enriquecidos con esta lignina, observándose una mayor consistencia en su degradación (Figura 3).

CONCLUSIONES

Los medios enriquecidos con lignina nativa (Lignina Organosolv de *Quercus* spp.), permiten aislar y describir de manera complementaria la diversidad de comunidades bacterianas ligninoliticas (cultivables en laboratorio) dentro de la rizosfera, lo que valida de manera parcial la hipótesis propuesta, el total de aislamientos obtenidos ayuda a demostrar la eficacia del protocolo de extracción Organosolv para obtener lignina biológicamente activa. A su vez, el hallazgo de los aislamientos propuestos como actinomicetos, con una mayor capacidad de degradación, es indicativo de la eficiencia de

este polímero como fuente de carbono en medios selectivos, abriendo perspectivas para su aplicación biotecnológica.

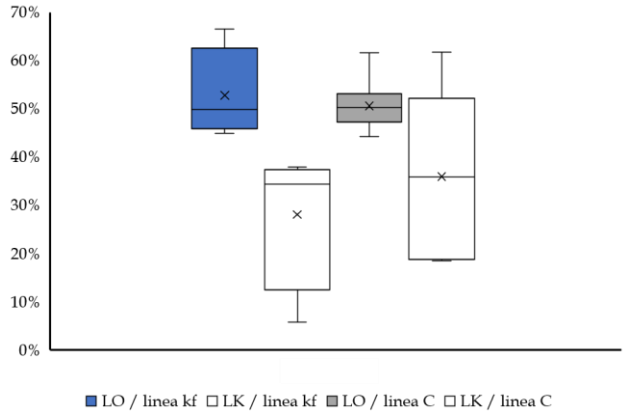


Figura 2. Comparación del cambio absoluto en la degradación de lignina en bacterias inducido por lignina natural y comercial y línea de cultivo de origen.

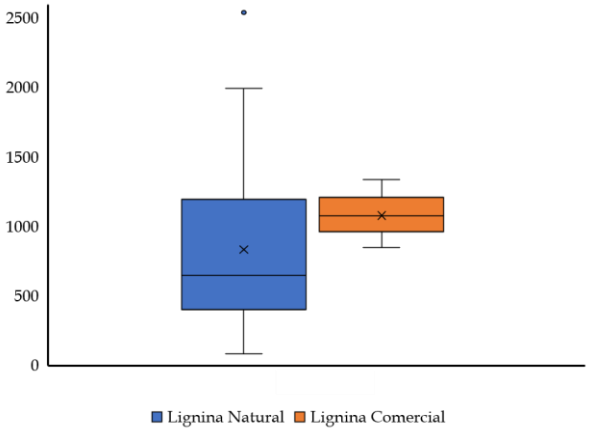


Figura 3. Comparación del cambio absoluto en la degradación de lignina en bacterias inducido por lignina natural y comercial y línea de cultivo de origen.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo económico brindado a través del proyecto DGAPA PAPIIT clave IN222521 Degradación de la lignina y su contribución como fuente de carbono al humus del suelo. Este respaldo fue fundamental para la culminación del presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

García, J.A. (2019). Determinación de actividad antioxidante en lignina obtenida de residuos agrícolas [Tesis de licenciatura]. Universidad de Sonora.

Heitner, C., Dimmel, D. & Schmidt, J. (Eds.). (2016). Lignin and lignans: Advances in chemistry. CRC Press.

Huang, X. F., Santhanam, N., Badri, D. V., Hunter, W. J., Manter, D. K., Decker, S. R., Vivanco, J. M. & Reardon, K. F. (2013). Isolation and characterization of lignin-degrading bacteria from rainforest soils. *Biotechnology and Bioengineering*, 110(6), 1616–1626. https://doi.org/10.1002/bit.24833.

Katahira, R., Elder, T. J. & Beckham, G.T. (2018). A brief introduction to lignin structure. En: Lignin valorization (pp. 1– 20). Royal Society of Chemistry.

Madigan, M.T., Bender, K.S., Buckley, D.H., Sattley, W.M. & Stahl, D.A. (2022). Brock Biology of Microorganisms (16th ed.). Pearson.

Montoya, M. L. & Muñoz, G.A. (2014). Degradación de lignina en lodos provenientes de la industria papelera mediante el empleo del Ganoderma lucidum [Tesis de pregrado]. Universidad Tecnológica de Pereira.

Muratova, A., Hubner, T., Tischer, S., Turkovskaya, O., Moder, M. & Kuschk, P. (2003). Plant–rhizosphere-microflora association during phytoremediation of PAH-contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation,* 5(2), 137–151. https://doi.org/10.1080/713610176.

Nhuchhen, D. R., Basu, P. & Acharya, B. (2014). A comprehensive review on biomass torrefaction. *International Journal of Renewable Energy and Biofuel*s, 2014, 1–56. https://doi.org/10.5171/2014.506376.

Ortiz, M. L. (2009). Aproximaciones a la comprensión de la degradación de la lignina. Orinoguia, 13(2), 137–144.

´Saini, A., Aggarwal, N. K., Sharma, A. & Yadav, A. (2015). Actinomycetes: A source of lignocellulolytic enzymes. *Enzyme Research,* 279381. https://doi.org/10.1155/2015/279381.

Prescott, L. M., Harley, J. P. & Klein, D.A. (2005). Microbiología (6ª ed.). McGraw-Hill.

Sun, R. & Tomkinson, J. (2001). Comparative study of lignins isolated by alkali and ultrasound-assisted alkali extractions from wheat straw. *Ultrasonics Sonochemistry,* 9(2), 85-93.

Tarasov, D., Leitch, M. & Fatehi, P. (2018). Lignin-carbohydrate complexes: Properties, applications, analyses, and methods of extraction: A review. *Biotechnology for Biofuels,* 11(1), 269. https://doi.org/10.1186/s13068-018-1262-1.

Xu, F., Sun, J. X., Sun, R., Fowler, P. & Baird, M.S. (2006). Comparative study of organosolv lignins from wheat straw. *Industrial Crops and Products*, 23(2), 180–193. https://doi.org/10.1016/j.inderop.2005.05.008.

Yaovapa T., Toru J., Yoshimasa, M., Shigeharu, M., Savitt, T., Navavarn, N., Moriya, O. & Toshiaki, K. (2005). Symbiotic fungi produce laccases potentially involved in phenol degradation in fungus combs of fungus-growing termites in Thailand. *Journal of General and Applied Microbiology,* 51(1), 1–9. https://doi.org/10.2323/jgam.51.1.

Zhang, L., Gellerstedt, G. & Ralph, J. (2010). NMR studies on the occurrence of spirodienone structures in lignins. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 30(1), 61-75. https://doi.org/10.1080/02773810903419217.

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD PROMOTORA DEL CRECIMIENTO VEGETAL DE *Sphingomonas trueperi* AISLADA DEL MUCÍLAGO DEL MAÍZ OLOTÓN

Orlando Catalán Barrera[1]; Alejandro Alarcón[1]; Ronald Ferrera Cerrato[1]; César San Martín Hernández[2]; Laura Verónica Hernández Cuevas[3]

[1] Microbiología de Suelos, Postgrado de Edafología, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco km 36.5. Montecillo 56264, Estado de México, México.
[2] Fertilidad de Suelos, Postgrado de Edafología, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco km 36.5. Montecillo, 56230, Estado de México, México.
[3] Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tlajomulco. Carretera Tlajomulco-San Miguel Cuyutlán, Cto. Metropolitano Sur, 45640, Jalisco, México.

Correo del autor para correspondencia: orlandocatalan1@hotmail.com

RESUMEN

El maíz es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, y el maíz Olotón es un maíz nativo de México que secreta un mucílago que alberga una alta cantidad bacteriana benéfica. Este trabajo evaluó el efecto de *Sphingomonas trueperi* y diferentes dosis de fertilización en el crecimiento de plantas de maíz Olotón, en invernadero. Se utilizó un diseño experimental con seis tratamientos y nueve repeticiones; se aplicaron tres niveles de fertilización consistentes en agua, y solución nutritiva Long Ashton al 15% y 30%, después de 30 días de la inoculación, se evaluó la altura y el área foliar. La inoculación de *S. trueperi* mostró mayores valores en comparación con los testigos; asimismo, la implementación de soluciones nutritivas mostró mejores resultados en comparación con las plantas regadas con agua, por último, la combinación de bacterias y fertilización mejoró el crecimiento de las plantas respecto a las plantas con aplicación de agua y sin inoculación. La solución al 15% mostró resultados similares o mayores a la fertilización con solución al 30%. La combinación microbiana con fertilización química es una alternativa factible para estimular el crecimiento de plantas de maíz Olotón.

PALABRAS CLAVE: *Agricultura; fijación de nitrógeno; maíz nativo; nitrógeno.*

INTRODUCCIÓN

El maíz tiene importancia a nivel mundial ya sea por su producción como por su comercialización y puede ser utilizado como alimento para la población humana y los animales. Derivado de la alta variedad de usos que se le puede dar en las diferentes etapas del cultivo del maíz, su aprovechamiento es fuente de diversos productos industriales (Guzmán-Guzmán *et al.,* 2020). Por su parte, las bacterias son uno de los grupos microbianos más abundantes con los que las plantas se relacionan, gracias a su influencia en los ciclos biogeoquímicos, tienen la capacidad de adaptarse y sobrevivir en distintas condiciones ambientales (Corrales *et al.,* 2015).

El maíz alberga una amplia diversidad de bacterias benéficas asociadas a sus diferentes órganos, las cuales gracias a las propiedades bioquímicas de importancia en la agricultura son consideradas como bacterias promotoras del crecimiento vegetal (Din *et al.,* 2021), favoreciendo la adaptación y la supervivencia del maíz en condiciones adversas (Tang *et al.,* 2020).

En México existe una amplia variedad de maíces cultivados, incluidos los maíces criollos o nativos, los cuales forman parte elemental en la historia y desarrollo de este cultivo y la alimentación humana, destacando el maíz Tunicado, Palomero toluqueño y Olotón, entre muchos más (Wellhausen *et al*., 1951). A su vez, estos maíces también presentan asociaciones microbianas que están relacionadas con procesos bioquímicos y enzimáticos que benefician la nutrición vegetal (Ferrera-Cerrato *et al.,* 2024).

De manera particular, el maíz Olotón gracias a sus características anatómicas y condiciones ambientales en las que crece, secreta en sus raíces adventicias aéreas, un mucilago que alberga diversas bacterias como las del género *Sphingomonas*, que están relacionadas con la fijación de nitrógeno y la producción de fitohormonas que estimulan el crecimiento y la nutrición del maíz (Turrent *et al.,* 2025). La presente investigación evaluó el efecto de la inoculación de la cepa *S. trueperi* y diferentes dosis de fertilización en el crecimiento temprano de plantas de maíz Olotón en invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en invernadero (30 °C y 30-50% de humedad relativa) en junio del 2024. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, con seis tratamientos y nueve réplicas cada uno. Los tratamientos consistieron en un testigo y la inoculación de *Sphingomonas trueperi* con la aplicación de tres niveles de fertilización (plantas regadas con agua, fertilizadas con solución Long Ashton al 15 % y 30%). Se llenaron bolsas de plástico con tres divisiones internas, con vermiculita estéril a tres cuartas partes de su capacidad; posteriormente, se colocaron las semillas de maíz Olotón y se cubrieron con más sustrato.

El inóculo bacteriano se preparó en 30 mL de caldo nutritivo en tubos Falcon. En cada tubo se agregó una asada de la cepa reactivada, y se incubaron por tres días a 160 rpm a 27 °C, hasta obtener la concentración bacteriana de $12x10^6$ UFC. De este stock de inóculo, se tomaron 30 µL y se colocaron en nuevos tubos con caldo nutritivo estéril durante tres días a 160 rpm a 27 °C.

Posteriormente, los tubos fueron centrifugados (7,000 rpm por 10 min, con una carga bacteriana de $19x10^8$ UFC) para eliminar el caldo nutritivo y sustituirlo con agua destilada estéril para resuspender con vortex la pastilla bacteriana remanente con una carga final $11x10^8$.UFC mL^{-1}. Después de 30 días de la inoculación, se midió la altura de las plantas con una cinta métrica y el área foliar con un integrador de área foliar LICOR (LI 3000, Inc. Lincoln, NE, EE. UU.). Los resultados de las variables determinadas se analizaron con el programa SAS mediante análisis de varianza y prueba de comparación de medias (Tukey, $p < 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La altura de las plantas incrementó en los tratamientos inoculados con la bacteria *S. trueperi* respecto a los testigos; el valor más alto se obtuvo con la inoculación de *S. trueperi* y la aplicación de solución nutritiva al 15%, y el valor más bajo en el testigo regado con agua (Figura 1A).

El área foliar de las plantas incrementó en los tratamientos inoculados con la bacteria *S. trueperi* respecto a los testigos; el valor más alto se obtuvo en la combinación de *S. trueperi* con la solución al 15% (42.7 cm^2) y el valor más bajo en el testigo regado con agua (Figura 1B). En ambas variables, los testigos como los tratamientos inoculados mostraron resultados significativamente similares en la aplicación de solución al 15% y 30%, pero mayores a los tratamientos regados con agua.

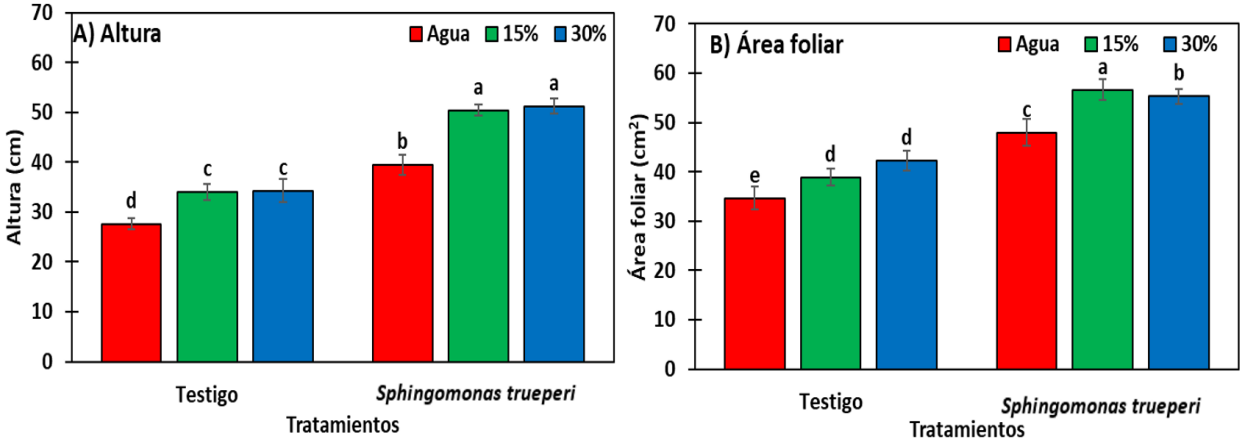


Figura 1. Efecto de la inoculación de *Sphingomonas trueperi* en combinación con las dosis de fertilización sobre la altura (a) y área foliar (b) de plantas de maíz Olotón, después de 30 días de crecimiento en condiciones de invernadero.

Letras diferentes en la misma gráfica denotan diferencias significativas entre los tratamientos (Tukey, α=0.05). Medias ± Error estándar. n=9.

La aplicación de solución nutritiva favoreció la altura de las plantas en comparación con la sola aplicación de agua destilada. En el caso del área foliar, se obtuvieron resultados ligeramente mayores con la solución nutritiva al 15% en comparación con la aplicación de solución al 30% o de agua (Figura 2A-B).

El maíz está asociado con diversos microorganismos, siendo el grupo de las bacterias el más abundante. Las interacciones entre el maíz y estos microorganismos aportan beneficios mutuos, permitiéndoles adaptarse conjuntamente ante diversas condiciones ambientales (Karasz *et al.,* 2022). El mucílago secretado por las raíces adventicias aéreas del maíz Olotón alberga abundantes bacterias que participan en procesos bioquímicos que benefician el crecimiento y nutrición de las plantas, además, generan un proceso de autofertilización (Ferrera-Cerrato *et al.,* 2024).

Las bacterias del mucilago son consideradas como promotoras del crecimiento vegetal al estar relacionadas con actividades relacionadas con la nutrición vegetal como lo es la

fijación biológica del nitrógeno atmosférico (FBN_2) y la producción de fitohormonas (Din *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2020).

El género *Sphingomonas* ha sido reportado como relevante en el ámbito agrícola debido a su capacidad para fijar nitrógeno (Menon *et al.*, 2019), como ha sido reportado en plantas como maíz y trigo (Xu *et al.*, 2018). Además, es capaz de producir otros compuestos como auxinas, sideróforos, y actividad de ACC desaminasa (Mazoyon *et al.*, 2023).

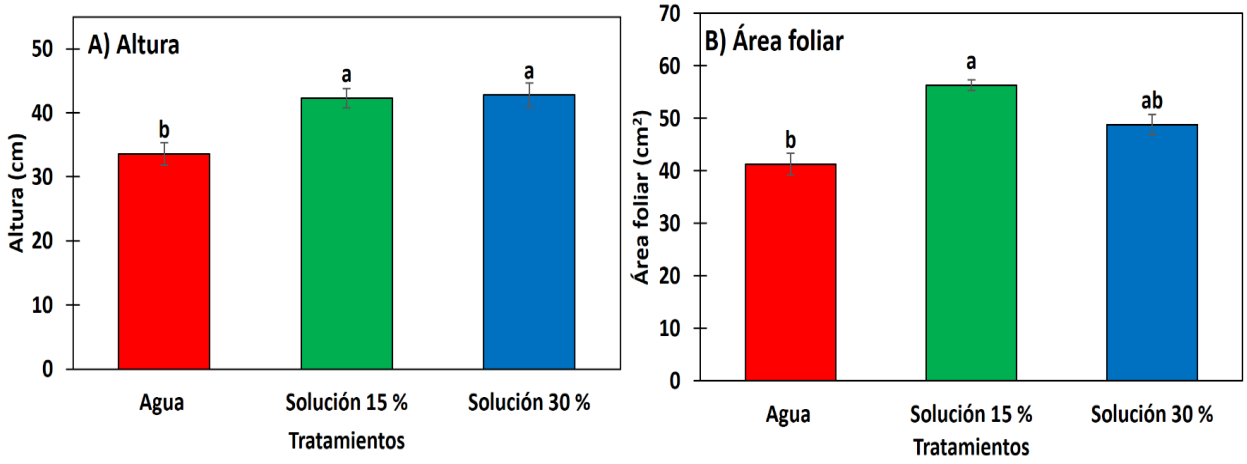


Figura 2. Efecto de la aplicación de tres niveles de fertilización en la altura (a) y área foliar (b), de plantas de maíz Olotón, después de 30 días de crecimiento en condiciones de invernadero.

Letras diferentes en la misma gráfica denotan diferencias significativas entre tratamientos de fertilización (Tukey, α=0.05). Medias ± Error estándar. n=18.

CONCLUSIONES

La inoculación *de S. trueperi* aislada del mucílago de maíz Olotón estimuló la altura y el área foliar de las plantas de maíz Olotón establecidas en invernadero.

La aplicación de las dos dosis de solución nutritiva favorece el crecimiento de maíz Olotón en invernadero, en comparación con las plantas regadas con agua.

La combinación del inoculante bacteriano con la fertilización benefició el crecimiento de las plantas en invernadero, lo que permite visualizar la posibilidad de reducción de fertilización química de las plantas en etapas tempranas.

AGRADECIMIENTOS

A la SECIHTI por el financiamiento del proyecto 317032 “Protección de la propiedad intelectual social del carácter Fijación Biológica de Nitrógeno del maíz Olotón y aprovechamiento en la seguridad y soberanía alimentaria de México”. El primer autor agradece a la SECIHTI la beca otorgada para realizar su programa doctoral en el Colegio de Postgraduados.

BIBLIOGRAFÍA

Corrales, L.C., Antolinez-Romero, D. M., Bohórquez-Macías, J. A. & Corredor-Vargas, A. M. (2015). Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, *13*(24), 55-81.

Din, I., Khan, H., Khan, N. A. & Khil, A. (2021). Inoculation of nitrogen fixing bacteria in conjugation with integrated nitrogen sources induced changes in phenology, growth, nitrogen assimilation and productivity of wheat crop. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *20*(7), 459-466.

Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A. & Rivera-Hernández, G. (2024). Microbiología del Maíz. Montecillo, México. *Colegio de Postgraduados*. ISBN: 978-607-715-484-6.

Guzmán-Guzmán, R. N., Desiderio-Vera, T. X., Villavicencio-Abril, Á. F., Ulloa-Cortázar, S. M. & Romero-Salguero, E. J. (2020). Evaluación del desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando cuatro híbridos. *Siembra*, *7*(2), 47-56.

Karasz, D. C., Weaver, A. I., Buckley, D. H. & Wilhelm, R. C. (2022). Conditional filamentation as an adaptive trait of bacteria and its ecological significance in soils. *Environmental Microbiology*, *24*(1), 1-17.

Lima, A. C. P., Medici, L. O., da Silva-Ballesteiro, D. A. G. & de Assis-Lima, E. (2020). Root growth in tomato seedlings in response to bacterial inoculation Serratia sp. *Research, Society and Development*, *9*(7), e89973634-e89973634.

Mazoyon, C., Catterou, M., Alahmad, A., Mongelard, G., Guénin, S., Sarazin, V. & Duclercq, J. (2023). *Sphingomonas sediminicola* Dae20 is a highly promising beneficial bacteria for crop biostimulation due to its positive effects on plant growth and development *Microorganisms 11*(8), 2061.

Menon, R. R., Kumari, S., Kumar, P., Verma, A., Krishnamurthi, S. & Rameshkumar, N. (2019). *Sphingomonas pokkalii* sp. nov., a novel plant associated rhizobacterium isolated from a saline tolerant pokkali rice and its draft genome analysis. *Systematic and Applied Microbiology*, *42*(3), 334-342.

Tang, A., Haruna, A. O., Majid, N. M. A. & Jalloh, M. B. (2020). Effects of selected functional bacteria on maize growth and nutrient use efficiency. *Microorganisms*, *8*(6), 854.

Turrent-Fernández, A., Martínez-Gutiérrez, A., Aguirre-Noyola, J.L., Catalán-Barrera, O., Martínez-Romero, E., Rosemblueth- Laguette, M., Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A. & Barkin, D. (2025). Fijación Biológica de nitrógeno en maíz de la raza nativa Olotón y su aprovechamiento en México. INIFAP. Ciudad de México, México. ISBN: en trámite.

Wellhausen, E. J., Roberts, L. M. & Hernández, E. (1951). Razas de maíz en México: Su origen, características y distribución. Mex. D. F. O E E/ S A G Folleto Técnico Nº 5 pp: 28

Xu, J., Kloepper, J. W., Huang, P., McInroy, J. A. & Hu, C. H. (2018). Isolation and characterization of N_2-fixing bacteria from giant reed and switchgrass for plant growth promotion and nutrient uptake. *Journal of Basic Microbiology*, *58*(5), 459-471.

EVALUACIÓN DE PELLETS DE ARCILLA COMO VÍA DE INOCULACIÓN BACTERIANA EN LECHUGA

Erika Albarrán Jaimes[1]; Orlando Catalán Barrera[2]; Ronald Ferrera Cerrato[2]; Jazmín Cortés Sarabia[1]; Alejandro Alarcón[2]

[1] Instituto Tecnológico de Ciudad Altamirano, Av. Pungarabato Pte. S/N, Pungarabato 40665, Guerrero, México.

[2] Microbiología de suelos, Postgrado de Edafología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco km 36.5. Montecillo 56264, Estado de México, México.

Correo de los autores de correspondencia: orlandocatalan1@hotmail.com

RESUMEN

La lechuga es producida y consumida a nivel mundial por su alto valor nutricional para la dieta humana. Este trabajo formuló pellets de arcilla como mecanismo de inoculación bacteriana, para asegurar su supervivencia y su efecto benéfico en plantas de lechuga, en invernadero. Se elaboraron diferentes pellets en laboratorio y se seleccionó aquel con mejores cualidades de resistencia y que asegurara la supervivencia de la bacteria *Raoultella terrigena*, considerando tiempos prolongados, para evaluar su efecto en plantas de lechuga. Se establecieron dos tratamientos y cuatro repeticiones, en un diseño experimental completamente al azar. Treinta días después de la inoculación se evaluó el peso fresco y peso seco de las plantas. Los resultados muestran que los pellets mantuvieron las cualidades físicas del producto durante tres meses de evaluación, así como la supervivencia bacteriana. La inoculación bacteriana mediante los pellets formulados favoreció el crecimiento de las plantas; el peso fresco y el peso seco mostraron valores más altos con la inoculación bacteriana en comparación con el testigo. Los biofertilizantes implementados a través de formulaciones de pellets, son una alternativa adecuada que asegura la eficacia y el beneficio bacteriano, para su implementación en cultivos agrícolas.

PALABRAS CLAVE: *Biotecnología; inoculantes; maíz Olotón; nitrógeno; Raoultella terrigena.*

INTRODUCCIÓN

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una hortaliza importante a nivel mundial, ya que cuenta con un alto valor productivo y económico, considerada esencial en la dieta humana por su valor nutrimental, ya que su consumo aporta cantidades importantes de vitaminas y minerales. Para su producción, se requieren suelos fértiles y a menudo el uso de fertilizantes para un óptimo desarrollo (Lamichhane *et al.*, 2018).

Las bacterias conforman uno de los grupos de microorganismos más abundantes en el planeta, cumplen diferentes funciones en la naturaleza como la mineralización de la materia orgánica (Karasz *et al.* 2022). Estas funciones tienen efectos benéficos para las plantas a través de la mineralización nutrimental en el suelo, protección contra patógenos, formación del suelo, entre otros, por lo cual son consideradas como bacterias

benéficas para las plantas (Consentino *et al.,* 2022). Derivado del uso excesivo de fertilizantes en la agricultura, se han buscado formas más ecológicas para resolver problemas ambientales derivados del uso desmedido de químicos, mediante alternativas que también sean accesibles para los agricultores (Goulet *et al*., 2013).

En este sentido, el uso de inoculantes microbianos ha aumentado constantemente en los sistemas agrícolas, éstos incluyen microorganismos como bacterias benéficas que interactúan con las plantas para mejorar la absorción de nutrientes y aumentar la resistencia a enfermedades (Alori y Babalola, 2024), y paulatinamente, reducir el uso de fertilizantes, promoviendo una agricultura sostenible mediante el uso biorracional tanto de microorganismos benéficos como de dosis de fertilización que no dañen el ambiente (Cotta *et al*., 2023). Esta investigación evaluó la eficacia de pellets de arcilla como inoculante de *Raoultella terrigena* para favorecer el crecimiento de lechuga en invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se diseñaron formulaciones de pellets de arcilla como material principal y su combinación con inóculo bacteriano (Raoultella terrigena) de procedencia de aislamiento del mucílago de las raíces aéreas del maíz Olotón con concentración inicial de 80 x 10^{10} UFC mL^{-1}, y se realizaron evaluaciones mensuales a través del método de diluciones seriadas para determinar la supervivencia bacteriana, durante tres meses.

El experimento de invernadero (25 °C; 50% de humedad relativa) se realizó en septiembre de 2024. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, con dos tratamientos y cuatro réplicas cada uno. Los tratamientos consistieron en un testigo y la implementación de pellets inoculados con *R. terrigena*. Las semillas de lechuga se germinaron en semilleros con *peat moss* durante 15 días hasta su trasplante. Se llenaron bolsas de invernadero de 500 g con tezontle de tamaño de partícula de 2 mm estéril, a tres cuartas partes del volumen total. Las plantas se trasplantaron e inocularon con cuatro pellets alrededor del cepellón y se cubrieron con más sustrato. Las plantas testigo solo trasplantaron a las bolsas con tezontle, sin inoculación, y se recubrieron con más sustrato.

Después de 30 días de la inoculación, las plantas se cosecharon para evaluar su peso fresco y seco. Los datos obtenidos se sometieron al análisis de varianza y prueba de comparación de medias (Tukey, $p < 0.05$) mediante el software SAS Inc.

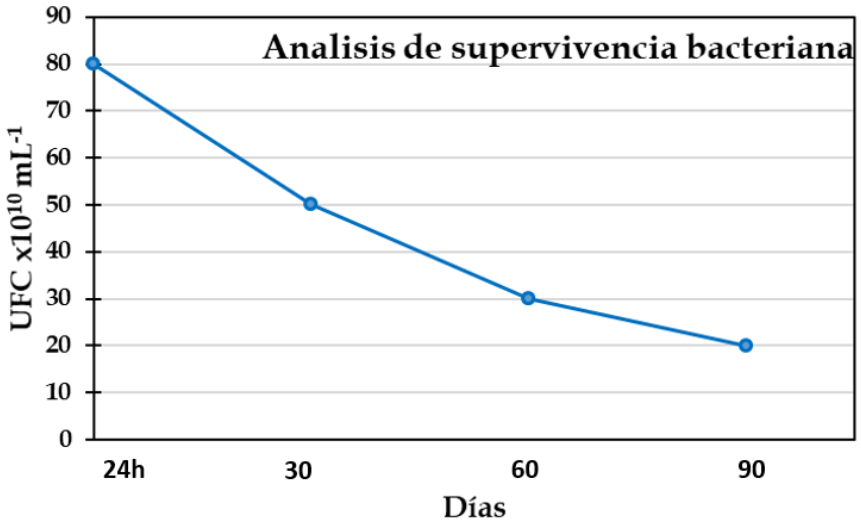
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados presentados corresponden a la valoración del efecto de la inoculación de la bacteria *R. terrigena* mediante una formulación tipo pellet como vía de inoculación en plantas de lechuga en invernadero. La fórmula usada para elaborar los pellets permitió la supervivencia bacteriana; el número de UFC al inicio de la formulación fue de 80 x10^{10}UFC mL^{-1}; las evaluaciones se realizaron durante tres meses posteriores y la concentración final fue de 20 x10^{10} UFC mL^{-1}, lo que permite apreciar que la población se redujo significativamente, aunque con el mismo factor de dilución (Figura 1).

La bacteria favoreció el crecimiento de las plantas respecto al testigo; el peso fresco aumentó significativamente en los tratamientos inoculados en comparación con el testigo, el valor más alto se mostró en la inoculación de *R. terrigena* y el valor más bajo en

el testigo (Figura 2A). El peso seco aumentó significativamente en el tratamiento inoculado, el valor más alto se obtuvo con *R. terrigena* y el valor más bajo en el testigo (Figura 2B).

Figura 1. Evaluación de la supervivencia bacteriana de *R. terrigena* inoculada en pellets



de arcilla durante 90 días después de su formulación.

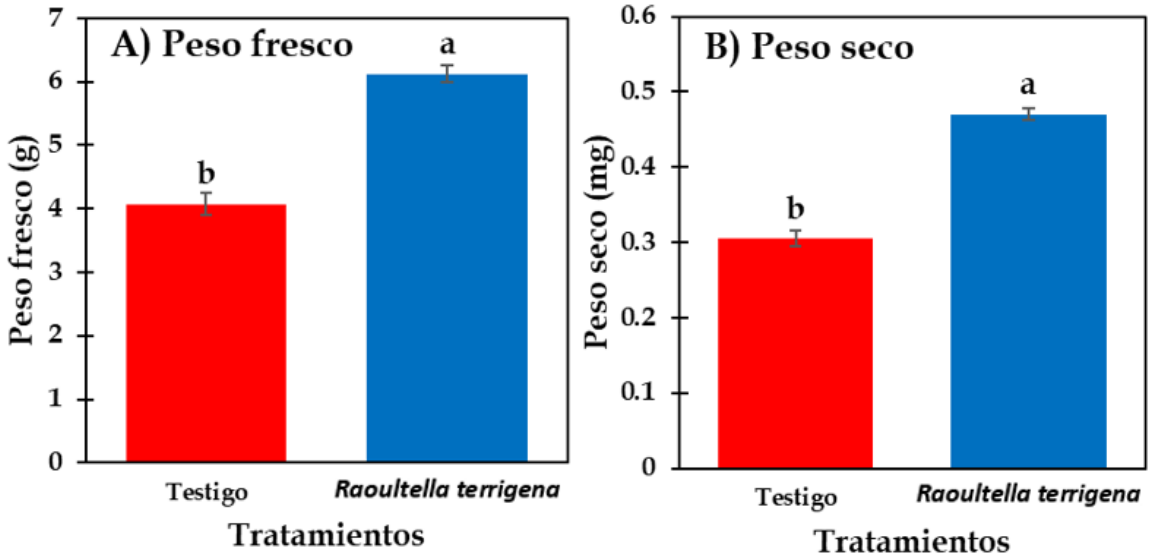


Figura 2. Efecto de la inoculación de pellets combinados con *R. terrigena* en el peso fresco (a) y peso seco (b), de plantas de lechuga, después de 30 días de crecimiento en condiciones de invernadero. Letras diferentes en la misma gráfica denotan deferencias significativas entre tratamientos (Tukey, α=0.05). Medias ± Error estándar. n=4.

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal tienen propiedades bioquímicas importantes que mejoran tanto el crecimiento como la salud de las plantas, a través de mecanismos que intervienen en la nutrición vegetal, en estímulos hormonales, y en el control contra patógenos (Ajijah *et al.*, 2023).

Las bacterias presentes en el mucílago del maíz Olotón, del cual fue aislada *R. terrigena*, cuentan con propiedades bioquímicas benéficas para las plantas como la fijación de nitrógeno, producción de fitohormonas y solubilización de fosfatos mediante las cuales intervienen en el crecimiento del mismo maíz (Ferrera-Cerrato *et al.,* 2024), cualidades que se pudieron apreciar también en la presente investigación.

De manera particular, *R. terrigena* es una especie adecuada para su uso en la agricultura debido a su capacidad para promover el crecimiento vegetal (Singh y Arora, 2016; Martínez-Tlapanco *et al.,* 2021).

Gracias a las constantes investigaciones realizadas para mejorar la calidad de los inoculantes microbianos, las bacterias se han incluido en formulaciones con diferentes materiales y nuevas formas de implementación en las plantas, de los que destacan la encapsulación en material de arcilla, alginato o turba. En todos los casos, el objetivo principal es asegurar la eficacia microbiana en las plantas según sea su objetivo, y los diferentes procesos de formulación deben asegurar, entre otras, la facilidad de inoculación, supervivencia microbiana y efectos en los cultivos (Valencia *et al.,* 2021).

CONCLUSIONES

La fórmula implementada para la elaboración de pellets usados como inoculante, mantiene la supervivencia bacteriana hasta tres meses después de su formulación.

El uso de los pellets es eficaz para liberar las bacterias y promover el crecimiento de las plantas bajo condiciones en un invernadero.

La inoculación de *R. terrigena* aislada del mucílago de las raíces adventicias aéreas del maíz Olotón promueve el crecimiento de plantas de lechuga.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Área de Microbiología del Posgrado de Edafología, Colegio de Postgraduados, el uso de infraestructura, materiales y espacios para realizar las actividades de la presente investigación.

BIBLIOGRAFÍA

Ajijah, N., Fiodor, A., Pandey, A. K., Rana, A. & Pranaw, K. (2023). Plant growth-promoting bacteria (PGPB) with biofilm-forming ability: a multifaceted agent for sustainable agriculture. *Diversity, 15*(1), 112.

Alori, E. T. & Babalola, O. R. (2024). Microbial Inoculants for Improving Crop Quality and Human Health in Africa. *Frontiers in microbiology*, *9*, 2213.

Consentino, B. B., Aprile, S., Rouphael, Y., Ntatsi, G., De Pasquale, C., Iapichino, G. & Sabatino, L. (2022). Application of PGPB combined with variable N doses affects growth, yield-related traits, N-fertilizer efficiency and nutritional status of lettuce grown under controlled condition. *Agronomy*, *12*(2), 236.

Cotta, S. R., Pereira, A. P. D. A. & Verma, J. P. (2023). Microbiome-based technologies: Use of inoculants for improving agricultural productivity and sustainability. *Frontiers in Soil Science. 3*(1), 1-3.

Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A. & Rivera-Hernández, G. (2024). Microbiología del Maíz. Primera edición. Montecillo, México. *Colegio de Postgraduados*. ISBN: 978-607-715-484-6.

Goulet, P. E., O'Donnell, M. P. & Mauchline, T. H. (2013). The rise of ecological alternatives in agricultural practices: A sustainable approach. *Journal of Sustainable Agriculture, 37*(5), 532–547.

Karasz, D. C., Weaver, A. I., Buckley, D. H. & Wilhelm, R. C. (2022). Conditional filamentation as an adaptive trait of bacteria and its ecological significance in soils. *Environmental Microbiology, 24*(1), 1-17.

Lamichhane, J. R., Dürr, C., Schwanck, A. A., Robin, M. H., Sarthou, J. P., Cellier, V. & Aubertot, J. N. (2018). Integrated management of damping-off diseases. A review. *Agronomy for Sustainable Development, 37*(2), 10.

Martínez-Tlapanco, A., Méndez-Bravo, A., Sánchez-Nájera, R. A. & Mercado-Flores, Y. (2021). Bacterias promotoras del crecimiento vegetal: mecanismos y aplicaciones en agricultura sostenible. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 12*(6), 1427-1444.

Singh, A. & Arora, N. K. (2016). Rhizosphere microbiomes: Influence on plant growth and stress resistance. *Springer. 9*(2), 19-31.

Valencia, L., Hernández, M. & Rodríguez, P. (2021). Efecto de inoculantes microbianos en el crecimiento y rendimiento de cultivos agrícolas. *Revista de Agricultura Sostenible, 15*(2), 45–58.

Rahnella aquatilis AISLADA DEL MUCÍLAGO DEL MAÍZ OLOTÓN, PROMUEVE EL CRECIMIENTO DE PLANTAS DE CHILE

Ma. Araceli Mateo Cabrera[1]; Orlando Catalán Barrera[2]; Ronald Ferrera Cerrato[2]; Alejandro Alarcón[2]; Ángel Mena García[3]; Jazmín Cortés Sarabia[1]

[1] Instituto Tecnológico de Ciudad Altamirano, Av. Pungarabato Pte. S/N, Pungarabato 40665, Guerrero, México.
[2] Microbiología de suelos, Postgrado de Edafología, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco km 36.5. Montecillo 56264, Estado de México, México.
[3] Nutrición vegetal, Postgrado de Edafología, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco km 36.5. Montecillo 56264, Estado de México, México.

Correo del autor de correspondencia: orlandocatalan1@hotmail.com

RESUMEN

El chile es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial debido a su producción y comercialización, del cual México es centro de origen y diversificación. Este trabajo evaluó el efecto de la inoculación de *Rahnella aquatilis* y tres dosis de fertilización en plantas de chile en invernadero. Se utilizó un experimento factorial (2x3), con seis tratamientos y cinco repeticiones en un diseño experimental completamente al azar, considerando dos niveles de inoculación (con inoculación y sin inoculación) y tres niveles de fertilización que consistieron en agua destilada, solución nutritiva Long Ashton al 25 % y 50%. Después de 30 días de la inoculación, se evaluó la altura y área foliar de las plantas. Los resultados indican que *R. aquatilis* mostró mayores valores en comparación con los testigos. La aplicación de soluciones nutritivas mostró mejores resultados en comparación con las plantas regadas con agua. La inoculación bacteriana combinada con la fertilización mejoró el crecimiento de las plantas respecto a las plantas regadas con agua y sin inoculación. Las soluciones nutritivas al 25% y 50% mostraron resultados similares en las plantas. La combinación microbiana con fertilización química es una alternativa adecuada para su implementación en el cultivo de chile.

PALABRAS CLAVE: *Agricultura; biotecnología; fertilización; fijación de nitrógeno.*

INTRODUCCIÓN

El chile es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial debido a sus diferentes usos como en la alimentación y en la medicina, lo cual se refleja en su valor económico y cultural; México es el lugar de origen y diversificación de este cultivo (Urbina *et al.,* 2023; Momo *et al.,* 2022).

Por otra parte, las bacterias son microorganismos abundantes en la naturaleza, que participan en la transformación de la materia orgánica, producen metabolitos, tienen diversas interacciones biológicas y participan en los ciclos biogeoquímicos; algunos grupos de ellas, son promotores del crecimiento vegetal (Morales *et al.,* 2022).

El maíz Olotón, es una variedad nativa de México conocida por la secreción de un mucílago en las raíces adventicias aéreas, mismo que alberga alta cantidad de bacterias como las del género *Rahnella*, entre otras más, y que participan en diferentes procesos bioquímicos que influyen directamente en el crecimiento de la planta (Turrent *et al.,* 2025).

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de la inoculación de la cepa *R. aquatilis* y diferentes dosis de fertilización en el crecimiento temprano de plantas de maíz Olotón, en condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en condiciones de invernadero (25 °C y 50% humedad relativa) de octubre a noviembre del 2024. Se utilizó un experimento factorial 2x2, incluyendo dos niveles de inoculación de la bacteria *R. aquatilis* previamente aislada del mucílago del maíz Olotón (con y sin) y tres niveles de fertilización aplicada con la solución nutritiva Long Ashton (sin solución nutritiva, con solución al 25%, y con solución al 50%), de los cuales se obtuvieron seis tratamientos con cinco réplicas cada uno, distribuidos en un diseño experimental completamente al azar.

Las semillas de chile se germinaron en almácigos con turba estéril y se mantuvieron en crecimiento durante 30 días para su trasplante. Se utilizaron recipientes de unicel de 300 mL conteniendo tezontle estéril (2 mm tamaño de partícula) y se trasplantaron las plantas de chile. A los 10 días después del trasplante, las plantas correspondientes fueron inoculadas aplicando 5 mL del inóculo a cada planta.

El inóculo bacteriano se elaboró en 30 mL de caldo nutritivo en tubos Falcón esterilizados a 120 °C por 18 min, y aplicando una colonia de la cepa reactivada. Los tubos se pusieron en agitación por tres días a 160 rpm a 27 °C, hasta obtener una carga bacteriana de $21x10^7$ UFC mL^{-1}. De este stock de inóculo, se tomaron 30 µL y se colocaron en nuevos tubos con caldo nutritivo estéril durante tres días a 160 rpm a 27 °C. Una vez alcanzada la concentración de 15 $x10^7$ UFC mL^{-1}, los tubos se centrifugaron a 7,000 rpm por 10 min; se eliminó el caldo nutritivo y se sustituyó por agua destilada estéril para resuspender, con vortex, la pastilla bacteriana, quedando listo el inóculo para su aplicación a las plantas.

Después de 30 días de la inoculación, se midió la altura con una regla, y el área foliar con un integrador de área foliar LICOR (LI 3000, Inc. Lincoln, NE, EE. UU.). Los resultados de las variables determinadas se analizaron con el programa SAS mediante análisis de varianza y prueba de comparación de medias (Tukey, $P \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La inoculación bacteriana incrementó el crecimiento de las plantas respecto a las plantas sin inoculación. La altura aumentó significativamente en los tratamientos inoculados bajo los tres niveles de fertilización. Las plantas inoculadas con *R. aquatilis* combinada con solución nutritiva al 25% o al 50% registraron el valor más alto en este parámetro de crecimiento, mientras que el valor más bajo se presentó en plantas regadas con agua destilada. Por otra parte, la altura fue estadísticamente similar en plantas

suministradas con solución al 25% y 50%, dentro de cada nivel de inoculación (Figura 1A).

El área foliar incrementó significativamente en los tratamientos inoculados comparados con las plantas sin inoculación; el valor más alto se obtuvo con *R. aquatilis* combinada con la solución al 50% y el valor más bajo en el testigo regado con agua destilada (Figura 1B).

La solución nutritiva favoreció el crecimiento de las plantas con respecto a la sola aplicación de agua destilada. La aplicación de solución nutritiva al 25% mostró resultados similares a la aplicación de solución al 50% en la altura de las plantas (Figura 2A), mientras que el área foliar aumentó al incrementar la concentración de la solución nutritiva (Figura 2B).

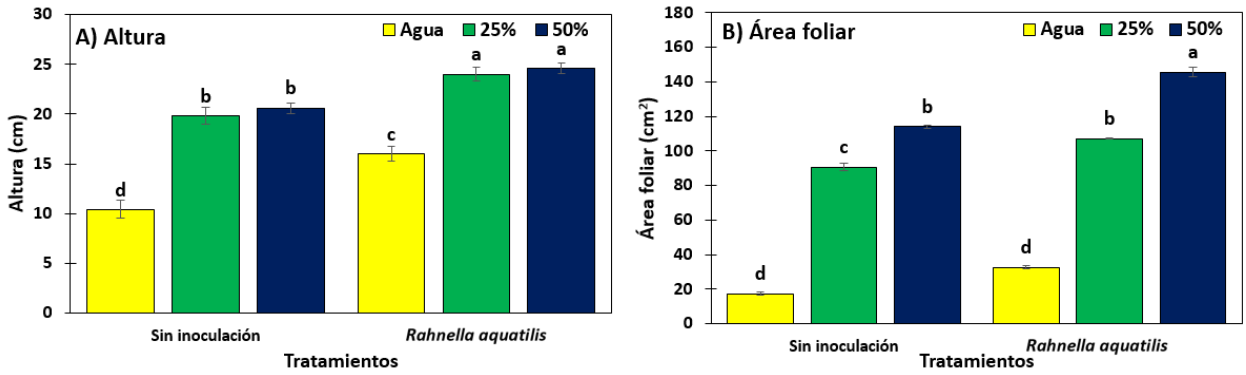


Figura 1. Efecto de la inoculación de *Rahnella aquatilis* y dosis de fertilización en A) altura y B) área foliar de plantas de chile, después de 30 días de crecimiento en condiciones de invernadero.

Letras diferentes en la misma gráfica denotan diferencias significativas entre tratamientos (Tukey, $p \leq 0.05$). Medias ± Error estándar. n=5.

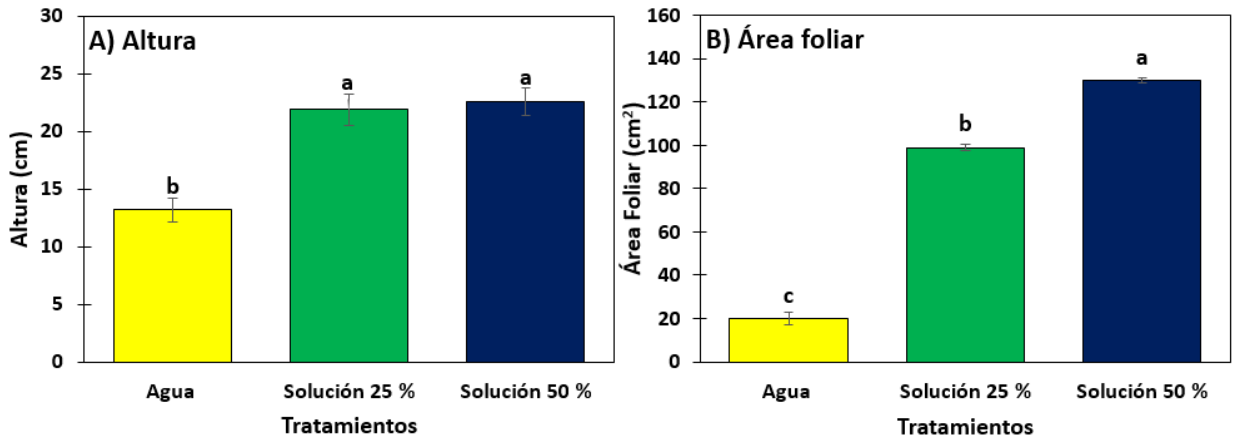


Figura 2. Efecto de la aplicación de dosis de fertilización en A) altura y B) área foliar de plantas de chile, después de 30 días de crecimiento en condiciones de invernadero.

Letras diferentes en la misma gráfica denotan diferencias significativas entre tratamientos de fertilización (Tukey, $p \leq 0.05$). Medias ± Error estándar. n=10.

Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal se asocian con diferentes especies vegetales e intervienen directamente en la salud y crecimiento de las plantas, su diversidad y abundancia depende de factores como las propiedades bioquímicas de las bacterias, etapa fenológica vegetal, y condiciones ambientales (Din *et al.,* 2021; Lima *et al.,* 2020) o a través de otros procesos ambientales como su participación en la mineralización de la materia orgánica (Tortosa *et al.,* 2021).

Particularmente, el mucílago secretado en las raíces adventicias aéreas del maíz Olotón alberga alta cantidad bacteriana que beneficia el crecimiento y la nutrición de la misma, principalmente a través de la fijación biológica de nitrógeno y la producción de fitohormonas (Ferrera-Cerrato *et al.,* 2024).

La cepa *R. aquatilis* es una especie con cualidades importantes para su implementación en los sistemas agrícolas, ya que se ha comprobado su capacidad para solubilizar fosfatos (Landa-Acuña *et al.,* 2023) y su influencia en la estimulación de la germinación de semillas de maíz o el crecimiento de plantas como uchuva (Li *et al.,* 2021; Chávez y Celina, 2019).

CONCLUSIONES

La bacteria *R. aquatilis* aislada de mucigel de raíces adventicias aéreas de maíz Olotón incrementó el crecimiento de chile establecidas en invernadero.

El uso dosificado de la solución nutritiva favorece el crecimiento de chile en invernadero comparado con aquellas plantas con la sola aplicación de agua.

La combinación de *R. aquatilis* con 25% o 50% de solución nutritiva beneficia el crecimiento de chile en invernadero.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Área de Microbiología del Posgrado de Edafología, Colegio de Postgraduados, por facilitar la infraestructura, materiales y espacios para realizar las actividades de la presente investigación.

BIBLIOGRAFÍA

Chávez, F. & Celina, L. (2019). Efecto de la interacción entre microorganismos PGPR con hongos formadores de micorrizas arbusculares para la promoción de crecimiento vegetal en aguaymanto (*Physalis peruviana* L.). *Agrociencia, 48*(3), 285-294.

Din, I., Khan, H., Khan, N. A. & Khil, A. (2021). Inoculation of nitrogen fixing bacteria in conjugation with integrated nitrogen sources induced changes in phenology, growth, nitrogen assimilation and productivity of wheat crop. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *20*(7), 459-466.

Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A. & Rivera-Hernández, G. (2024). Microbiología del maíz. Primera edición. Montecillo, México. *Colegio de Postgraduados*. ISBN: 978-607-715-484-6.

Landa-Acuña, D., Toro, M., Santos-Mendoza, R. & Zúñiga-Dávila, D. (2023). Role of *Rahnella aquatilis* AZO16M2 in phosphate solubilization and ex vitro acclimatization of *Musa acuminata* var. Valery. *Microorganisms. 11*, (6), e 1596.

Li, G. E., Kong, W. L., Wu, X. Q. & Ma, S. B. (2021). Phytase-producing *Rahnella aquatilis* JZ-GX1 promotes seed germination and growth in corn (*Zea mays* L.). *Microorganisms, 9*(8), e, 1647.

Lima, A. C. P., Medici, L. O., da Silva-Ballesteiro, D. A. G. & de Assis-Lima, E. (2020). Root growth in tomato seedlings in response to bacterial inoculation *Serratia* sp. *Research, Society and Development*, *9*(7), e89973634-e89973634.

Momo, J., Kumar, A., Islam, K., Ahmad, I., Rawoof, A., & Ramchiary, N. (2022). A comprehensive update on *Capsicum* proteomics: Advances and future prospects. *Journal of Proteomics. 261*, 104578.

Morales, M. E., Villamil, M. B. & Zabaloy, M. C. (2022). Efecto de los cultivos de cobertura invernales sobre el microbioma del suelo: revisión sistemática de la literatura. *Revista Argentina de Microbiología, 54*(1), pp. 51-60.

Tortosa, G., Fernández-González, A. J., Lasa, A. V., Aranda, E., Torralbo, F., González-Murua, C. & Bedmar, E. J. (2021). Involvement of the metabolically active bacteria in the organic matter degradation during olive mill waste composting. *Science of the Total Environment, 789*, 147975.

Turrent-Fernández, A., Martínez-Gutiérrez, A., Aguirre-Noyola, J. L., Catalán-Barrera, O., Martínez-Romero, E., Rosemblueth- Laguette, Monica., Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A. & Barkin, D. (2025). Fijación Biológica de nitrógeno en maíz de la raza nativa Olotón y su aprovechamiento en México. Primera edición. INIFAP. Ciudad de México, México. ISBN: en trámite.

Urbina-Sánchez, E., Cuevas-Jiménez, A., Reyes-Alemán, J. C., Alejo-Santiago, G., Valdez-Aguilar, L. A. & Vázquez-García, L. M. (2023). Solución nutritiva adicionada con NH^{4+} para producción hidropónica de chile huacle (*Capsicum annuum* L.). *Revista Fitotecnia Mexicana. 43*(3), 291-298.

RESPIRACIÓN DEL SUELO EN ÁREAS CON CULTIVO Y SIN CULTIVO DE ZONAS SEMIÁRIDAS

Juan Pedro Flores Margez[1]; Alejandra Valles Rodríguez[1]; Pedro Osuna Avila[1]; Dolores Adilene García Gonzalez[1]

[1] Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, UACJ, Av. Plutarco Elías Calles no. 1210, FOVISSSTE Chamizal, 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

Correo del autor por correspondencia: juflores@uacj.mx

RESUMEN

Los microorganismos y raíces de las plantas liberan CO_2 a la atmósfera; sin embargo, existe limitada información de las tasas de respiración del suelo para los ecosistemas semiáridos. El presente estudio tuvo el objetivo de evaluar las tasas de respiración edáfica en tres ecosistemas y su correlación con el contenido de materia orgánica, alcalinidad y salinidad. Las muestras de suelo se colectaron a una profundidad de 0 a 15 cm, en cinco sitios de cada ecosistema (agrícola, agostadero y urbano). Las variables evaluadas fueron el contenido de materia orgánica, salinidad y alcalinidad, mientras que la respiración del suelo fue evaluada al cuantificar el C-CO_2 con un método basado en medición de la conductividad eléctrica del reactivo KOH 0.5 en incubaciones aeróbicas de cuatro días por triplicado. El suelo agrícola presentó la más alta concentración de sales, seguido por el agostadero, mientras que el suelo urbano no tuvo problema de sales, lo cual fue inverso al pH. Las tasas de respiración del suelo fueron diferentes significativamente entre ecosistemas, donde la tasa de emisión de C-CO_2 en el suelo fue ligeramente menor en el agostadero explicado por menor contenido de materia orgánica y con problema de sales. El suelo de parque urbano mostró más respiración que los demás, al superar con 68 en promedio, las tasas en mg C-CO_2 kg·día^{-1}a los suelos agrícolas y agostadero.

PALABRAS CLAVE: *Agostadero; agricultura; dióxido de carbono; pH; suelo urbano.*

INTRODUCCIÓN

El problema de cambio climático relacionado con el ciclo global del carbono es de suma importancia en ecosistemas de zonas semiáridas, ya que la emisión de CO_2 por la respiración del suelo y raíces es un factor clave que impacta en el suelo y la atmósfera (Lal, 2004). La respiración del suelo es el proceso mediante el cual se libera CO_2 del suelo, principalmente a través de la actividad de microorganismos y raíces de las plantas (Weil y Brady, 2017; Ryan y Law, 2005). Es un indicador clave de la salud del suelo y el funcionamiento de los ecosistemas y las tasas de respiración del suelo varían significativamente entre las diferentes regiones y tipos de uso del suelo debido a las diferencias en las condiciones ambientales, la vegetación y las prácticas de manejo (Zhou *et al*., 2010). La respiración del suelo se ve influenciada por diversos factores bióticos y abióticos, como la temperatura del suelo, la humedad, el uso del suelo y el tipo de vegetación. Esta respuesta proporciona un análisis exhaustivo de los cambios en la

respiración del suelo en regiones templadas, tropicales y áridas, centrándose en parques urbanos, suelos agrícolas y suelos no cultivados. La magnitud de respiración del suelo reportadas para diferentes ecosistemas se puede apreciar en el Cuadro 1 donde ciertos estudios fueron realizados en suelos áridos y semiáridos, mostrando una amplia variación, en parte por las diferencias en condiciones ambientales, las técnicas de medición y el manejo de los suelos. Por ejemplo, Ayala *L* (2018) muestran valores muy bajos, mientras que Gutiérrez *et al.* (2022) reportan tasas de hasta 24.2 mg C-CO_2 kg día^{-1}, seguido de Campuzano *et al.* (2025) con 12.5 mg C-CO_2 kg día^{-1}. Estas referencias muestran que la respiración del suelo en regiones áridas y semiáridas puede fluctuar enormemente y sirven de base referencial para los estudios edáficos.

Cuadro 1. Tasas de respiración de suelo en mg C-CO2 kg día^{-1} en diferentes ecosistemas.

Referencia	mg C-CO_2 kg día	Zona evaluada
Zhang *et al*. (2009)	1.91 a 14.52	Kelayami, China
Ayala *et al*. (2018)	0.79 a 6.60	Baja California Sur, México
Yu *et al*. (2021)	2.3 a 13.5	China
Gutiérrez *et al*. (2022)	24. 2	Matorral desértico del desierto Chihuahuense
Campuzano *et al*. (2025)	12. 5	Coahuila, México

Factores importantes para considerar para las zonas áridas en México son que son suelos que se caracterizan por tener bajo contenido de materia orgánica y nitrógeno total, alcalinos y con variados niveles de salinidad. Por ejemplo, en el norte del estado de Chihuahua predominan los grupos de suelo: Calcisols, Gypsisols, Arenosols, Solonetz y Regosols principalmente (INEGI, 2017). Ante la necesidad de generar información que apoye el conocimiento de la respuesta de los suelos sometidos a diferentes manejos en el ecosistema árido, se planteó este estudio con el objetivo de comparar la respiración del suelo en tres ecosistemas con variación en los niveles de materia orgánica, alcalinidad y salinidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los sitios de estudio fueron el principal parque urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua denominado "El Chamizal" que se localiza a 31° 45′ 26″ de N y 106° 27´ 31″ W, altitud promedio de 1,200 msnm. Los sitios de uso de suelo agrícola y de agostadero se ubicaron al sur del municipio de Juárez a 31° 22′ 08″ de N y 106° 27′ 04″ W, así como otra área en 31° 20′ 52″ de N y 106° 29′ 57″ de W. Las muestras de suelo colectadas en el parque urbano fueron de cuatro sectores, cinco muestras compuestas por sector a profundidad de 0 a 30 cm, mientras que en las áreas agrícola y de agostadero fueron cinco localidades de cada uno, y tres muestras compuestas por localidad. Las muestras de suelo fueron secadas, molidas y tamizadas a 2 mm. De acuerdo con la clasificación mundial WRB, el suelo del parque urbano corresponde al grupo Calcisols (del latín *calx*, cal), son suelos con acumulación significativa de material calcáreo (carbonato cálcico), ricos en bases, que están muy extendidos en ambientes semiáridos (WRB, 2015; INEGI, 2017). Estos suelos

provienen de depósitos aluviales, coluviales y eólicos de material meteorizado, con un horizonte subsuperficial Cámbico o Árgico, por sus cambios en contenidos de arcilla. De manera más específica, la clasificación del suelo a nivel Serie se ubica en la Serie Juárez, esto de acuerdo con la clasificación de suelos del Distrito de riego del Valle de Juárez realizado en 1969 por la Secretaría de Recursos Hidráulicos (CIEPS, 1970). La clasificación de los suelos en las áreas agrícolas y de agostadero corresponde al grupo Gypsisols que se caracteriza por la acumulación significativa de yeso (sulfato de calcio), ya que debido a la alta evaporación ocurre la precipitación del yeso a partir de aguas subterráneas o superficiales (INEGI, 2017). Los análisis de las muestras consistieron en pH, conductividad eléctrica, textura y materia orgánica, esto conforme a los lineamientos de la NOM-021-RECNAT-2000. La medición de CO_2 fue con el método de trampa alcalina que se basa en la medición de conductividad eléctrica del KOH 0.5 M indicado por Cornell Soil Health Laboratory (2022). Este método consiste en pesar 20 g de suelo, que son humedecidos por capilaridad hasta llegar al punto de saturación de suelo incubado durante cuatro días. Los análisis estadísticos consistieron en revisar la distribución normal de datos, obtener los parámetros descriptivos, análisis de varianza de una vía y comparación múltiple de promedios con la técnica Tukey al 0.05 con el programa SPSS versión 24.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tasa de respiración microbiana fue diferente significativamente entre ecosistemas ($p < 0.05$), donde el suelo del parque urbano presentó la mayor respiración al superar en 47.29 mg C-CO_2 kg día^{-1} al suelo de uso agrícola, mientras que este último fue mayor en 10.72 al suelo dedicado al agostadero en zonas áridas del noroeste del estado de Chihuahua (Cuadro 2). El contenido de materia orgánica no fue diferente entre ecosistemas y es clasificado como muy bajo conforme a la norma NOM-021-RECNAT-2000, aunque la tendencia fue mayor en 0.25% en el suelo de parque urbano. El pH de los suelos mostró muy poca variación, de neutro a ligeramente alcalino, al incrementarse en 0.64 unidades en el suelo del parque urbano, mientras que en el suelo agrícola fue menor. La salinidad de los suelos presentó una variación considerable desde no salino hasta extremadamente salino, donde el suelo agrícola presentó 16.7 dS m^{-1} más conductividad que el de parque urbano y 7.3 más que el de agostadero.

Cuadro 2. Comparación de promedios entre ecosistemas para las variables respiración del suelo, el contenido de materia orgánica, pH y conductividad eléctrica.

Variable	Ecosistema		
	Agrícola	Agostadero	Urbano (parque)
Respiración (mg C-CO_2 kg·día^{-1})	29.77 ± 2.35 b	19.05 ± 3.11 c	77.06 ± 5.79 a
Materia orgánica (%)	1.748 ± 1.902 a	1.679 ± 1.554 a	1.934 ± 2.319 a
pH	7.260 ± 0.06 b	7.345 ± 0.05 b	7.899 ± 0.08 a
CE (dS m^{-1})	20.347 ± 0.77 a	13.086 ± 1.98 b	3.632 ± 0.39 c

Promedios y error estándar; letras iguales entre promedios no son diferentes significativamente, (alfa=0.05). n=21 (agrícola), n=9 (agostadero), n=19 (urbano). CE= conductividad eléctrica.

En general, se puede observar tendencias de mayor respiración del suelo con el contenido de materia orgánica y menor concentración de sales solubles en los suelos, mientras que el pH fue mayor a nivel bajo de salinidad. Al comparar los valores de emisión de C-CO_2 del presente estudio con las referencias se puede apreciar que, para agostadero y agrícola, 19 a 29 mg C-CO_2 kg día^{-1}, las tasas de respiración están cercanos a lo reportado por Gutiérrez *et al.* (2022) con 24.2 mg C-CO_2 kg día^{-1}, pero más altos que lo indicado por Campuzano *et al.* (2025) con 12.5 mg C-CO_2 kg día^{-1}. Mientras que lo encontrado en el presente estudio para suelo de parque urbano supera el doble la tasa de respiración que, en suelo agrícola, lo cual puede explicarse tanto por el grupo de suelo y su manejo (Li *et al*, 2024; Lai *et al*., 2012), ya que en el parque urbano fue suelo Calcisols, mientras que en agrícola y agostadero fue grupo Gypsisols con altos niveles de salinidad. Esto apoya en que la respiración del suelo en regiones áridas y semiáridas puede variar considerablemente debido a las condiciones ambientales y el manejo de los suelos.

CONCLUSIONES

Las variaciones en las tasas de respiración del suelo pueden ser explicadas por la naturaleza y el manejo de los suelos, así las cantidades menores de emisión de C-CO_2 en el suelo de agostadero se relaciona con menor contenido de materia orgánica y menor actividad microbiana, seguido por el suelo de uso agrícola en el mismo grupo de suelo Gypsisol alto en carbonato de calcio y salinidad, mientras que el suelo de parque urbano con menor salinidad y mayor cantidad de materia orgánica duplico la tasa de respiración. Estos cambios en la respiración del suelo para los ecosistemas estudiados son importantes por sus implicaciones en los flujos de emisión de CO_2 a la atmósfera.

BIBLIOGRAFÍA

Ayala-Niño, F., Maya-Delgado, Y. & Troyo-Diéguez, E. (2018). Almacenamiento y flujo de carbono en suelos áridos como servicio ambiental: Un ejemplo en el noroeste de México. *Terra Latinoamericana*, *36*(2), 93. https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.334.

Brady, N.C. & Weil, R.R. (2017). The nature and properties of soils. 15th ed., Prentice Hall. Upper Saddle River NJ USA 1086 p.

CIEPS. (1970). Estudio de Factibilidad para la rehabilitación del Distrito de Riego (Valle de Juárez, Chihuahua), Secretaría de Recursos Hidráulicos, Irrigación y Control de Ríos. CONAGUA número 325. México DF.

Campuzano, E. F., Guillén-Cruz, G., Juárez-Altamirano, R. & Flores-Rentería, D. (2025). Seasonal and land use effects on soil respiration and its controlling factors in arid lands from northeastern Mexico. *Soil Systems, 9*(1), 12.

Gutiérrez-Gutiérrez, M., Mendoza-Aguilar, D. O., Pando-Moreno, M. & González-Rodríguez, H. (2022). Influencia de las biocostras en el flujo de CO2 en el matorral desértico micrófilo del altiplano mexicano. *Terra Latinoamericana*, *40*. https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1211.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) (2017). Superficie por tipo de uso de suelo en México. https://www.inegi.org.mx/temas/suelo/ (Consulta: 30 marzo 2024).

Lal R (2004) Carbon Sequestration in Dryland Ecosystems. *Environ Manage* 33: 528–544.

Lai, L., Xuechun, Z., Lianhe, J., Yongji, W., Liangguo, L., Yuanrun, Z., Xi, C. & Glyn, M. (2012). Soil Respiration in Different Agricultural and Natural Ecosystems in an Arid Region. *PLOS One*, 7:10.

Li, Y., K. Zhang, Y. Li, P. Wan, *et al.* (2024). Temperature sensitivity of soil respiration to elevated temperature and nitrogen availability. *Soil & Tillage Research*, 244:106267.

Ryan, M. G., & Law, B. E. (2005). Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry,* 73, 3–27. https://doi.org/10.1007/s10533-004-5167-7.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2000). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000: Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.* Diario Oficial de la Federación.

WRB, Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (2015). Base referencial mundial del recurso suelo. (2014), actualización, 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma, Italia.

Yu, H., Liu, X., Ma, Q., Yin, Z., Wang, Y., Xu, Z. & Zhou, G. (2021). Climatic warming enhances soil respiration resilience in an arid ecosystem. *The Science of the total environment*, *756*, 144005. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144005.

Zhang, L., Chen, Y., Li, W. & Zhao, R. (2009). Abiotic regulators of soil respiration in desert ecosystems. *Environmental Geology*, *57*(8), 1855-1864. https://doi.org/10.1007/s00254-008-1474-y.

Zhou, H., Li, W., Yang, Y., Cao, Z. (2010). Soil Respiration Variant and Its Effecting Factors at Different Land Use in Arid Land. *Chinese Academy of Sciences*. 31(2): 190-196. https://doi.org/10.3390/soilsystems9010012.

INCORPORACIÓN DE SUSTRATOS DE MAÍZ EN UN SUELO CALCÁREO: DINÁMICA DE C-CO_2 Y NITRÓGENO

Javier Clemente Oliver Gorzo[1]; Gerardo Sergio Benedicto Valdés[1]; Santos Martínez Santiago[1]

[1] Colegio de Postgraduados, Edafología, Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56264, Texcoco, Estado de México, México.

Correo del autor de correspondencia: oliver.javier@colpos.mx

RESUMEN

El Carbono orgánico (COS) e Inorgánico del suelo (CIS), conforman el Carbono Total del Suelo (CTS). Existen pocos estudios sobre la dinámica del flujo de C-CO_2 y N en suelos calcáreos, en respuesta a la incorporación de olote y rastrojo de maíz. El objetivo fue evaluar la variación de pH, CE, COS, N, C/N y flujo de C-CO_2 en un suelo de la Comarca Lagunera. Se determinaron sus propiedades químicas, al inicio y término del experimento. Se incubaron durante 30 días, agregados del suelo (< 0.5 mm) con olote y rastrojo, a dosis de 1, 3 y 5%. Se midió el flujo de C-CO_2 y se mantuvo a humedad volumétrica (14 y 27%). El pH inicial del suelo (7.4) disminuyó a 7.0 con olote y 6.8 con rastrojo. La CE inicial aumentó de 0.0398 a 0.106 y 0.321 dS m^{-1} con olote y rastrojo; respectivamente. El COS inicial disminuyó de 1.04% a 0.88% con olote y aumentó a 1.20% con rastrojo; el N aumentó de 0.64% a 0.72% (olote) y 0.82% (rastrojo), la relación C/N inicial disminuyó de 1.6 a 1.2 (olote) y 1.5 (rastrojo). A 27% de humedad, los tratamientos con olote y rastrojo presentaron flujos acumulados de C-CO_2 de 1,298.29 y 1,241.08 µmol m^{-2} s^{-1}, que representan incrementos del 169.9% y 158.0% con respecto al testigo (481.05 µmol m^{-2} s^{-1}). Este estudio demuestra que la incorporación de olote y rastrojo, incrementó la dinámica de C-CO_2 y N, sugiriendo una alternativa para aumentar el COS.

PALABRAS CLAVE: *C-CO_2; suelo calcáreo; incubación; olote; rastrojo.*

INTRODUCCIÓN

En el suelo, el almacén de Carbono está determinado por dos diferentes fracciones: el Carbono orgánico (COS) y el Carbono inorgánico del suelo (CIS) (Ayala-Niño *et al*., 2018). Aunque la mayor parte del carbono edáfico suele almacenarse en forma orgánica, en regiones áridas y semiáridas predominan las formas inorgánicas, principalmente en forma de carbonatos (Martínez-Santiago *et al*., 2022). Las propiedades químicas del suelo pueden cambiar con la aplicación de enmiendas orgánicas (Bastida *et al*., 2008). Estos efectos dependen del manejo agrícola, el riego, la fertilización, incluso el tipo de cultivo (Kim *et al*., 2020).

En México, cerca del 80% de los suelos en zonas áridas son calcáreos (12.75 millones de hectáreas) (Durán *et al*., 2024). Son limitados los estudios sobre la dinámica de C-CO_2, N y su respuesta en la incorporación de residuos agrícolas. El contenido bioquímico del olote y rastrojo, en particular su relación C/N, influye en su eficiencia de mineralización

en el suelo (Stewart *et al*., 2015; Hadas *et al*., 2004). La humedad del suelo también regula el flujo de C- CO_2 al afectar la actividad microbiana (Lellei-Kovács *et al*., 2011).

Por cada Mg de grano de maíz producido se generan 1.3 Mg de rastrojo y 0.2 Mg de olote (Sokhansanj *et al*., 2010), por lo que en condiciones de temporal se estima una producción de 1.45 Mg ha^{-1} de rastrojo y 0.22 Mg ha^{-1} de olote. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la variación de pH, CE, COS, CIS, NTS, C/N y el flujo de C-CO_2, en un suelo calcáreo de la Comarca Lagunera, en respuesta a la incorporación de olote y rastrojo de maíz (al 1, 3 y 5%). Se utilizaron incubaciones controladas para cuantificar la dinámica del C-CO_2 y del N, lo que permitió determinar la tasa de mineralización del carbono.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron muestras de un suelo calcáreo de la Comarca Lagunera a 0.30 m de profundidad. Los residuos de olote y rastrojo de maíz fueron colectados y molidos a 1 mm y caracterizados (pH, CE, CO, N y C/N). El suelo se analizó conforme a la Norma Oficial Mexicana para determinar sus siguientes propiedades; pH, CE, COS, CIS, CTS, N, C/N, punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (CC), densidad aparente (Da) y textura. Se incubaron 100 g de suelo utilizando agregados menores a 0.5 mm. En frascos herméticos de 500 mL durante 30 días. Se agregaron tres dosis de sustrato; 1, 3 y 5%, con tres repeticiones, además de un testigo sin sustrato.

Se aplicaron dos contenidos de humedad gravimétrica: 14 y 27%, equivalentes a PMP (1,500 kPa) y CC (33 kPa). Los niveles de humedad se mantuvieron constantes y añadiendo agua destilada. El flujo de C-CO_2 se cuantificó cada dos días utilizando un Analizador de Gases por Infrarrojos (IRGA) PP Systems (Hitchin, Herts, Reino Unido). Los datos de C-CO_2 en ppm emitidas por el IRGA, fueron convertidas a: Flujo de C-CO_2: $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ (Bocanegra, 2007). Al término del experimento se midieron las propiedades: pH, CE, COS, N y C/N, de los tratamientos bajo CC. Se utilizo el diseño completamente al azar. Mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) y los valores promedio se compararon mediante una prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) con el software estadístico R (versión 4.4.0; Viena, Austria).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1, se detallan los valores obtenidos en la caracterización del suelo. El COS representó 10.3% (43.7 Mg ha^{-1}) del CTS, en comparación con el CIS que fue del 89.7% (387.06 Mg ha^{-1}). El CTS alcanzó un promedio de 430.7 Mg ha^{-1}. El CIS fue de 89.7% del CTS con 387.1 Mg ha^{-1}. El contenido de NTS fue de 0.64%, con un valor estimado de 26.88 Mg ha^{-1}. Los valores de humedad gravimétrica fueron de 14.2% para CC y 27.5% para PMP. La Da fue de 1.4 ±0.03 Mg m^3, textura del suelo se determinó como, franco arcilloso.

Los valores de químicos del olote fueron los siguientes: pH: 4.9 ±0.03, CE: 0.00203 ±0.15 $dS{\cdot}m^{-1}$, CO: 54 ±0.29%, N: 0.81 ±0.07% y C/N: 67 ±5.34. Para olote los valores fueron de pH: 6.7 ±0.07, CE: 4.2 ±0.30 $dS{\cdot}m^{-1}$, CO: 46 ±1.66%, N: 0.85 ±0.06% y C/N: 54 ±2.11.

Cuadro 1: Propiedades químicas de un suelo calcáreo de La Comarca Lagunera, México.

Propiedad	pH	CE	COS	CIS	CTS	NTS	C/N
		dS m^{-1}		%			
	7.4	0.0398	1.04	9.06	10.10	0.64	1.6
DE ±	0.06	0.72	0.05	0.24	0.28	0.04	0.16

CE: conductividad eléctrica, COS: carbono orgánico del suelo, CIS: carbono inorgánico del suelo, (CTS) = COS + CIS: carbono total del suelo, NTS: nitrógeno total del suelo, C/N: relación carbono/nitrógeno, DE: desviación estándar.

Después de 30 días de incubación a CC, con tratamientos de olote y rastrojo al 1, 3 y 5%. Se determinaron sus valores de pH, CE, COS, N y C/N. En el Cuadro 2 se muestran las variaciones en las propiedades químicas del suelo en respuesta a la incorporación de olote y rastrojo.

Cuadro 2: Propiedades químicas del suelo incorporado con olote y rastrojo al 5%.

Propiedad	pH	CE dS m^{-1}	CO %	N %	C/N
Olote	7.0	0.180	0.88	0.72	1.2
DE ±	0.07	0.06	0.09	0.04	0.17
Rastrojo	6.8	0.384	1.20	0.82	1.5
DE ±	0.06	0.05	0.19	0.06	0.16

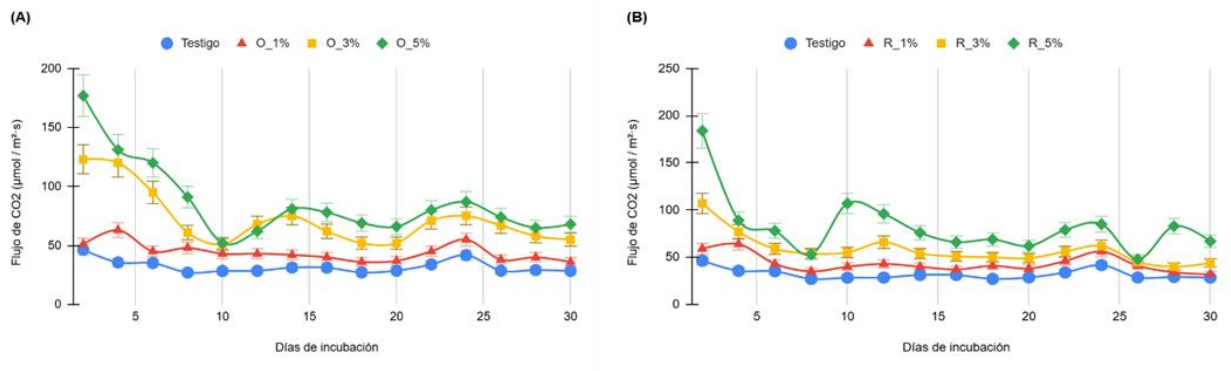
CE: conductividad eléctrica, COS: carbono orgánico del suelo, N: nitrógeno, C/N: relación carbono/nitrógeno, DE: desviación estándar.

Se consideraron los datos de incubación de sustratos al 5%, debido a su incremento significativo en comparación con los tratamientos al 1 y 3%. La incorporación de olote y rastrojo tiende a acidificar el suelo un 60%, en ambos tratamientos. González-Ubierna *et al.* (2012) reportan resultados similares en suelos calcáreos. El uso de olote tuvo un aumento medio marginal en la CE del 7%. Caso contrario del rastrojo, que incrementó considerablemente la CE hasta 28%. Ferrera *et al.* (2006) reportaron incremento en los valores de CE en suelos después de la aplicación de enmiendas orgánicas. Estudios señalan un efecto dependiente de la dosis en los incrementos de CE (Morugán-Coronado *et al.*, 2011). González-Ubierna *et al.* (2012) mencionan que las enmiendas orgánicas aumentan los valores de CE causado por la precipitación.

La incorporación con olote tuvo una variación marginal del COS del 19%. El rastrojo mejoró el contenido de COS de manera notable; en un 16%, resultados similares reporta Ntonta (2022). Se observó un aumento marginal del NTS con olote, teniendo un aumento del 8%. El rastrojo, tuvo un aumento relevante del 12% de NTS. Aunque la relación C/N mostró variaciones entre los tratamientos, fueron diferencias marginales entre el testigo y la incorporación con olote y rastrojo. La relación C: N, la tasa y el tamaño de los residuos de cultivo afectan la tasa de descomposición de C y N; por lo tanto, su C/N final (Moreno-Cornejo *et al.*, 2014).

El flujo de C-CO_2 se evaluó a CC, ya que esta humedad favorece su dinámica en el suelo. El flujo medio de C-CO2 para cada dos días; fue de 32.07 ± 5.65 µmol m^{-2} s^{-1} en el suelo testigo. Con la incorporación de olote, el flujo fue de 86.55 ± 7.5 µmol m^{-2} s^{-1}. En rastrojo, se encontró a 82.73 ± 7.34 µmol m^{-2} s^{-1}. El testigo tuvo la mayor emisión de 46.39 (día 2) y la menor de 27.04 (día 8) µmol m^{-2} s^{-1}. En suelo-olote, el pico fue de 176.76 (día

2) y el mínimo de 52.08 (día 10) µmol m^{-2} s^{-1}. Con suelo-rastrojo, la mayor emisión fue 183.55 (día 2) y la menor 48.3 (día 26) µmol m^{-2} s^{-1} (Figura 1), al igual que González-



Ubierna *et al*. (2012).

Figura 1. Tasa de flujo de C-CO_2: dosis y tratamientos de olote (A) y rastrojo (B) a humedad de 27% para un suelo calcáreo en la Comarca Lagunera, México.

CONCLUSIONES

La incorporación de olote y rastrojo de maíz a diferentes dosis, afecta de forma diferenciada las propiedades químicas y el flujo de C-CO_2 en un suelo calcáreo. Ambos sustratos incorporados al 5% tienden a acidificar el suelo, con reducciones del pH de hasta 60% respecto al testigo. La integración de olote mostró incrementos marginales en la CE, el COS y un aumento moderado del NTS. El rastrojo provocó un aumento notable en CE (hasta 28%), un aumento marginal del COS (16%) y NTS (12%).

Respecto al testigo (481.05 µmol m^{-2} s^{-1}), los tratamientos con olote y rastrojo presentaron flujos acumulados de C-CO_2 de 1,298.29 y 1,241.08 µmol m^{-2} s^{-1}, lo cual representa incrementos del 169.9% y 158.0%, respectivamente. Estos resultados evidencian la relevancia del tipo de enmienda, su dosis y la humedad del suelo en los procesos de mineralización y dinámica del C-CO_2 en suelos calcáreos.

AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCYT por el apoyo de beca para formación de posgrado del autor principal. Al Dr. Gerardo Sergio Benedicto Valdés y Dr. Santos Martínez-Santiago; por su apoyo y orientación en la realización de este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

Ayala-Niño, F., Maya Delgado, Y. & Troyo Diéguez, E. (2018). Almacenamiento y flujo de carbono en suelos áridos como servicio ambiental: Un ejemplo en el noroeste de México. *Terra Latinoamericana,* 36(2), 93–104. https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.334.

Bastida, F., Kandeler, E., Hernández, T. & García, C. (2008). Efecto a largo plazo de la modificación de los residuos sólidos urbanos sobre la abundancia microbiana y las actividades enzimáticas asociadas al humus en condiciones semiáridas. *Microbial Ecology*, 55, 651–661.

Bocanegra, L.M.O. (2007). Medición de la respiración del suelo en ecosistemas mediterráneos con sistemas de cámaras y analizadores tipo IRGA [Tesis de maestría]. Universidad de Granada, Granada, España.

Durán, D.U., Aguirre, H.D.I., Reimers, E.A.L., García, D.A.G. & Rentería, N.P.M. (2024). Exploration and valorization of natural resources from arid zones. En: [Editor/es si aplica], Título del libro, pp. 137–164.

Ferrera, L., Gomez, E., Toresani, S., Firpo, I. & Rotondo, R. (2006). Effect of organic amendments on some physical, chemical and biological properties in a horticultural soil. *Bioresource Technology,* 97(4), 635–640.

González-Ubierna, S., Jorge-Mardomingo, I., Carrero-González, B., Morugán-Coronado, A., García-Orenes, F., Mataix-Solera, J. & Mataix-Beneyto, J. (2012). Evolución de la materia orgánica del suelo tras la aplicación de altas dosis de enmiendas orgánicas en un suelo calcáreo mediterráneo. *Journal of Soils and Sediments,* 12, 1257–1268. https://doi.org/10.1007/s11368-012-0516-y.

Hadas, A., Kautsky, L., Goek, M. & Kara, E.E. (2004). Rates of decomposition of plant residues and available nitrogen in soil, related to residue composition through simulation of carbon and nitrogen turnover. *Soil Biology and Biochemistry,* 36, 255–266.

Kim, J., Jobbágy, E., Richter, D., Trumbore, S. & Jackson, R. (2020). Agricultural acceleration of soil carbonate weathering. *Global Change Biology,* 26(10), 1–15.

Lellei-Kovács, E., Kovács-Láng, E., Botta-Dukát, Z., Kalapos, T., Emmett, B. y Beier, C. (2011). Umbrales y efectos interactivos de la humedad del suelo en la respuesta térmica de la respiración del suelo. *Revista Europea de Biología del Suelo,* 47 (4), 247-255.

Martínez-Santiago, S., Benedicto-Valdés, G.S., López-Santos, A., Silva-Rojas, H.V., Ojeda-Trejo, E. & Ramírez-López, E.M. (2022). CO_2 emission affected by moisture content and aggregate sizes in a calcareous soil of Comarca Lagunera, Mexico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 46, e0210129. https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210129.

Moreno-Cornejo, J., Zornoza, R. & Faz, A. (2014). Mineralización de carbono y nitrógeno durante la descomposición de residuos de cultivo en un suelo calcáreo. *Geoderma,* 230, 58–63.

Morugán-Coronado, A., García-Orenes, F., Mataix-Solera, J., Arcenegui, V. & Mataix-Beneyto, J. (2011). Efectos a corto plazo del riego con aguas residuales depuradas en suelos calcáreos mediterráneos. *Soil and Tillage Research,* 112(1), 18–26.

Ntonta, S., Mathew, I., Zengeni, R., Muchaonyerwa, P. & Chaplot, V. (2022). Crop residues differ in their decomposition dynamics: Review of available data from world literature. *Geoderma,* 419, 115855.

Sokhansanj, S., Mani, S., Tagore, S. & Turhollow, A.F. (2010). Análisis tecnoeconómico del uso de rastrojo de maíz para suministrar calor y energía a una planta de etanol de maíz – Parte 1: Costo de la logística de suministro de materia prima. *Biomasa y Bioenergía,* 34(1), 75–81.

Stewart, C.E., Moturi, P., Follett, R.F. & Halvorson, A.D. (2015). Lignin biochemistry and soil N determine crop residue decomposition and soil priming. *Biogeochemistry,* 124, 335–351.

COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE CE MEDIANTE PASTA SATURADA Y PROPORCIONES 1:5 Y 1:10 EN SUELO COSTERO

Héctor Manuel Ortega Escobar[1]; Fabiel Vázquez Cruz[1]; Álvaro Can Chulim[2]; Oscar Raúl Mancilla Villa[3]; Isabel Mendoza Saldivar[4]

[1] Programa de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados. Carr. México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230, Texcoco, México.
[2] Unidad Académica de Agricultura, Universidad Autónoma de Nayarit. Carr. Tepic-Compostela km 9. 63780, Jalisco, México.
[3] Departamento de Producción Agrícola del Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara. Av. Independencia Nacional #151, centro Autlán de Navarro. 48900, Autlán, Jalisco, México.
[4] Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior del Oriente del Estado de Hidalgo. 43900, México.

Correo del autor de correspondencia: vazquez.fabiel@outlook.com

RESUMEN

La salinización del suelo es un problema que ha motivado la atención mundial. La salinidad del suelo es una limitación importante para la producción agrícola en las zonas costeras. Se requiere un control confiable en la determinación de la salinidad del suelo en un método menos laborioso que la metodología de extracción de pasta saturada (PS). El presente estudio se relaciona la conductividad eléctrica (Ce) del extracto de pasta saturada del suelo (EC_{ps}) con la conductividad eléctrica determinada en proporciones de masa de suelo y agua de 1:5 y 1:10. Se obtuvieron valores medios de (EC_{ps}) 56.31 ds m^{-1}, 6.78 para la relación 1:5 ds m^{-1}, y 3.63 ds m^{-1}, para 1:10. Los resultados han demostrado que existen fuertes relaciones lineales entre la ECe y los valores EC1:1 y EC1:5 (R^2 =0.94). Las extracciones (1:5) y (1:10) son métodos prácticos para estimar EC_{ps}.

PALABRAS CLAVE: *Conductividad eléctrica; extracto; dilución; Saturación.*

INTRODUCCIÓN

Los suelos salinos se encuentran generalmente localizados en zonas áridas y semiáridas, incluyéndose además cuencas endorreicas en zonas templadas, en consecuencia, la acumulación de sales se debe a condiciones específicas de intemperización geoquímica y bioquímica. Las partes superiores de los suelos se salinizan como consecuencia del ascenso capilar de las aguas freáticas con altas concentraciones de sales que se tienen a poca profundidad. Los suelos salinos suelen tener un contenido superior al 2% de sales disueltas, lo que genera presiones osmóticas que influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recolectaron 24 muestras de suelo procedentes de la zona costera del Valle de Santiago del estado de Nayarit. La profundidad fue de 0 hasta 120 cm, dividida en estratos de 10 cm. Después de la recolección, las muestras fueron secadas al aire y se

pasaron por un tamiz de 1 mm. Posteriormente las muestras fueron analizadas en el laboratorio de Ciencias Ambientales del Colegio de Posgraduados. Se prepararon extractos de pasta saturada añadiendo agua destilada a 400 g de muestra de suelo, removiendo hasta que alcanzó un estado de saturación completa (Rhoades, 1982). Para la proporción de suelo y agua de (1:5) se utilizaron 50 g de suelo y añadiendo 250 ml de agua destilada, para la proporción 1:10 se utilizaron 25 gramos de suelo añadiendo 250 ml de agua destilada. Se dejaron durante 24 h hasta alcanzar el equilibrio. Los extractos fueron obtenidos al vacío y se filtraron utilizando el filtro Whatman n.º 42.

La medición de la CE en pasta y extractos se realizó con un medidor de conductividad (Hanna HI 255). Se determinaron los valores de EC_{ps} (pasta saturada), $EC_{1:5}$ y $EC_{1:10}$ para todas las muestras. Para las relaciones funcionales $EC_{ps} = f(EC_{1:5})$ y $ECe = f(EC_{1:10})$, se aplicó una regresión lineal y se evaluó el coeficiente de determinación R^2. El coeficiente R^2 se utiliza para evaluar la correlación entre dos métodos independientes. Además, se incluyen sus valores medio, mediana, mínimo-máximo, y su error estándar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las conductividades de las muestras de suelo estudiadas oscilaron entre 27.45 y 174.8 dS m^{-1} para los extractos de EC_{ps}, entre 3.24 y 30.21 dS m^{-1} para (1:5), entre 1.68 y 16.14 dS m^{-1}, para (1:10) (Cuadro 1). A medida que aumenta la relación suelo-agua, la conductividad eléctrica disminuye debido a los efectos de dilución, tal y como sugieren el USDA (1954) y Rhoades (1982). La CE del extracto de pasta saturada (CE_{PS}) estuvo altamente correlacionada con la CE del extracto 1:5 y 1:10 ($r^2 = 0.88$). Estos resultados son similares a los obtenidos por otros investigadores, que encontraron relaciones significativas entre la ECSP y la $EC_{1:1}$ (Hogg y Henry, 1984; Shirokova *et al.*, 2000). Las relaciones obtenidas se muestran con y sin intersección para facilitar la comparación con hallazgos similares publicados (Figura 1).

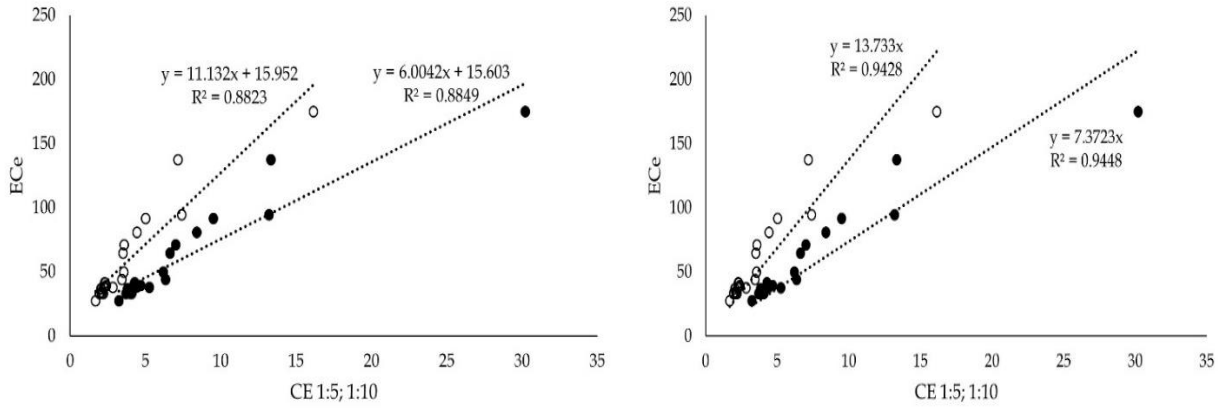


Figura 1. Las relaciones ECe = f (EC1:5) y ECe = f (EC1:10) para el primer sitio de muestreo (N = 24). Círculos oscuros para las relaciones ECe = f (EC1:5) y círculos abiertos para las relaciones ECe = f (EC1:10). Los valores de EC en dS m^{-1}. A la izquierda sin intercepción y a la derecha con intercepción.

Algunos autores han notificado fuertes relaciones lineales entre ECe y EC1:1 o EC1:5, los coeficientes que entran en estas relaciones no son constantes, sino que varían según el área de interés. Las causas que conducen a esta variación aún no están claras. La relación entre la ECe y la EC de diferentes extractos de agua-suelo se ve afectada por la textura del suelo y la presencia de sales y yeso en el suelo (USDA, 1954). Los valores de la pendiente son menores y a su vez coinciden con los que mencionan Kargas *et al*., 2018; indican que cuanto más fina es la textura del suelo, menor es la pendiente de la ecuación de estimación.

Cuadro 1. Índices estadísticos para los valores de conductividad eléctrica (dS m^{-1}) en los extractos de PS y métodos de relaciones suelo/agua 1:5 y 1:10 (N = 23).

Estadística	Saturación (PS)	1:5	1:10
Media	56.31	6.78	3.63
Mediana	39.15	4.36	2.33
Error estándar	7.45	1.17	0.63
Máximo	174.80	30.21	16.14
Mínimo	27.45	3.24	1.68

CONCLUSIONES

Los laboratorios que miden la salinidad del suelo pueden minimizar el costo y el tiempo asociados con el análisis mediante el uso de métodos menos costosos utilizando diferentes proporciones suelo-agua, manteniendo aún un alto nivel de exactitud y precisión.

Se recomienda el uso de las relaciones suelo:agua 1:5 y 1:10 durante la caracterización de los suelos salinos y sódicos debido a la facilidad de la obtención de los extractos acuosos.

BIBLIOGRAFÍA

Aboukila, E.F. & Norton, J.B. (2017). Estimation of Saturated Soil Paste Salinity from Soil-Water Extracts. Soil Science 182 (3): 107–13. DOI: https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000197. 14-3-2018.

Hogg, T.J. & Henry, J.L. (1984). Comparison of 1:1 and 1:2 suspensions and extracts with the saturation extract in estimating salinity in Saskatchewan soils. *Can. J. Soil Sci.,* 64:669–704.

Kargas, G., Chatzigiakoumis, I., Kollias, A., Spiliotis, D. & Kerkides, P. (2018). Investigación de la relación entre la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada de suelo ($CE_{e)}$ y los valores respectivos de las relaciones masa suelo/agua 1:1 y 1:5 ($CE_{1:1}$ y $CE_{1:5}$). *Actas, 2* (11), 661. https://doi.org/10.3390/proceedings2110661

Rhoades, J., Chanduvi, F. & Lesch, S. (1999). Soil Salinity Assessment Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements (57). FAO.

Shirokova, Y., Forkutsa, Y. & Sharafutdinova, N. (2000). Use of electrical conductivity instead of soluble salts for soil salinity monitoring in Central Asia. Irrig. Drain. Syst. 14:199–205.

United States Salinity Laboratory (1954). Diagnoses and Improvement of Saline and Alkali Soils; Agriculture Handbook No 60.

ENMIENDAS MINERALES EN EL USO CONSUNTIVO DE AGUA Y COBERTURA VEGETAL: UN ESTUDIO EN SUELOS BAJO AGRICULTURA INTENSIVA

Santos Martínez Santiago[1]; Moisés Márquez Velázquez[1]; Carlos Alexis Marín Jiménez [2]; Socorro Torres Reyes [2]

[1] Colegio de Postgraduados, Programa de Edafología, Campus Montecillo, Texcoco, CP. 56264, Estado de México, México.
[2] Universidad Tecnológica de Tecamachalco, Avenida Universidad Tecnológica 1, Barrio la Villita, Tecamachalco, CP. 75483, Puebla, México.

Correo del autor de correspondencia: martinez.santos@colpos.mx

RESUMEN

Las enmiendas minerales son una estrategia para la mejora de las propiedades de los suelos, especialmente los arenosos con baja retención de humedad. Estos cambios pueden evaluarse mediante un cultivo indicador, como la lechuga cuyas características reflejan las condiciones del entorno de crecimiento. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de enmiendas minerales sobre el uso consuntivo del agua y el desarrollo de la cobertura vegetal del cultivo de lechuga en un suelo bajo agricultura intensiva. Se determinaron propiedades físicas y químicas de un suelo de Acolman, Estado de México. Las unidades experimentales (UE) fueron contenedores con 1.5 kg de suelo. Los tratamientos fueron enmiendas minerales de zeolita y diatomita al 4% y 6%, respectivamente. En las UE se mantuvo un 80% de humedad aprovechable (HA), reponiendo agua cuando la humedad descendía a un rango de 40 – 45% de HA. La variable evaluada en el cultivo de lechuga fue la cobertura vegetal (%). El tratamiento con zeolita mejoró la estabilidad de agregados y demostró ser el más eficiente en el uso de agua siendo un 31.14% y 30.24% menor que los tratamientos de diatomita y el testigo, respectivamente. Además, la zeolita impulsó la cobertura vegetal, superando a la diatomita en un 51.53% y al testigo en un 57.55%, con un valor de cobertura del 10.79%. La incorporación de zeolita mejora la retención de humedad del suelo y promueve un mayor crecimiento de la cobertura vegetal.

PALABRAS CLAVE: *Retención de humedad; seguridad alimentaria; propiedades físicas; degradación de suelo.*

INTRODUCCIÓN

La agricultura intensiva ha contribuido significativamente a la producción de alimentos a nivel global; sin embargo, ha generado serios problemas de degradación del suelo y otros factores que afectan su productividad a largo plazo (Ortega *et al.,* 2024).

El suelo es un elemento esencial en el ciclo hidrológico, actuando como reservorio de agua para las plantas (Zhang *et al.,* 2021). Sin embargo, las prácticas asociadas con la agricultura intensiva conducen a la degradación de sus propiedades físicas y químicas

(Tripathi *et al.,* 2020), repercutiendo en su capacidad de retención de humedad, incrementando consecuentemente las necesidades del suministro de riego.

La incorporación de enmiendas minerales es una estrategia para la mejora de las propiedades físicas y químicas de los suelos (Garbowski *et al.,* 2023). Materiales como la zeolita se caracterizan por su alta porosidad y capacidad de intercambio catiónico, mejorando la estructura del suelo y aumentando su capacidad de retención de humedad para las plantas reduciendo las pérdidas por percolación y evaporación (Javaid *et al.,* 2024; Aksakal *et al*., 2012).

Los cambios en las propiedades del suelo pueden cuantificarse usando un cultivo indicador, ya que la medición de características específicas en las plantas ofrece información valiosa sobre las condiciones del entorno en el que crecen (Sanchez-Castillo *et al.* 2023).

El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de la adición de enmiendas minerales (zeolita y diatomita) sobre el uso consuntivo del agua y el desarrollo de la cobertura vegetal del cultivo de lechuga en un suelo bajo agricultura intensiva.

MATERIALES Y MÉTODOS

En abril de 2025 se colecto una muestra compuesta de suelo en un sistema de agricultura intensiva ubicado en Acolman, Estado de México (19.658999, -98.931855) a la cual se le determinaron propiedades físicas como la textura, la densidad aparente (DA), la capacidad de campo (CC), el punto de marchitez permanente (PMP), la humedad aprovechable (HA) y el diámetro medio ponderado (DMP), así como algunas propiedades químicas: pH, conductividad eléctrica (CE) y materia orgánica (MO).

Para el establecimiento del experimento, las unidades experimentales (UE) fueron contenedores plásticos de 22 x 22 x 14 cm donde se colocaron 1.5 kg de suelo seco. Los tratamientos aplicados fueron enmiendas minerales de zeolita y diatomita al 4% y 6%, respectivamente. Se utilizaron 5 repeticiones por tratamiento más un testigo, las cuales se distribuyeron en un diseño completamente al azar.

En todas las UE se mantuvo una humedad al 80% de HA, monitoreándose diariamente por diferencia de peso y reponiendo agua cuando la humedad descendía a un rango del 40-45% de HA.

Como cultivo indicador se utilizó lechuga (*Lactuca sativa*) variedad MAXIMUS. Estas se germinaron en charolas de 200 cavidades con sustrato de Peat Moss y se trasplantaron a los 44 días después de la siembra. La variable evaluada, a los 26 días después del trasplante, fue la cobertura vegetal (%) mediante la aplicación Canopy Cover (Easlon, 2015).

Los valores de DMP así como los datos acumulados del agua utilizada y de cobertura vegetal se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y los valores promedio se compararon mediante una prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) con el software estadístico R (versión 3.6.1; Viena, Austria).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La textura del suelo en sistema de agricultura intensiva colectado en Acolman, Estado de México, es migajón arenoso con 73% arenas, 14% de limos y 13 % arcillas. La DA del suelo es de 1.19 ± 0.01 Mg m^{-3}, mientras que para CC, PMP y HA los valores son de 30.1 ± 1.3, 14.3 ± 0.27 y 15.7 ± 1.02, respectivamente (Tabla 1). De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002), el pH fue moderadamente ácido, la CE indicó una condición de salinidad moderada y la materia orgánica tiene un valor alto.

Cuadro 1. Propiedades físicas de la muestra de suelo de Acolman, Estado de México.

Propiedad	Unidad	Valor		DE
DA	Mg m^{-3}	1.19	±	0.01
CC	%	30.1	±	1.3
PMP	%	14.3	±	0.27
HA	%	15.7	±	1.02
pH		6.4	±	0.08
CE	dS/m^{-1}	2.82	±	0.07
MO	%	3.9	±	0.19

DA: Densidad aparente; CC: Capacidad de Campo; PMP: Punto de Marchitez Permanente; HA (Humedad aprovechable) = CC - PMP; CE: Conductividad eléctrica; MO: Materia orgánica; DE: Desviación Estándar.

De acuerdo con Le Bissonnais (2016), los valores del DMP (Figura 1) fueron clasificadas como inestables (0.68) para el testigo y la diatomita (0.71), mientras que el tratamiento de zeolita mostró una estabilidad media (0.87).

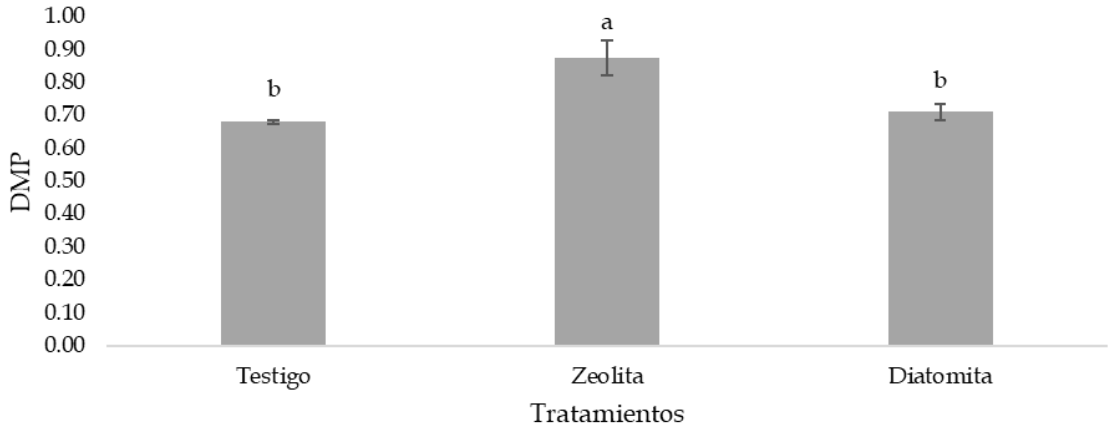


Figura 1. Diámetro medio ponderado (DMP) en los diferentes tratamientos de enmiendas minerales a suelos de Acolman, Estado de México.

Estos hallazgos concuerdan con lo descrito por Aksakal *et al*. (2012), quienes observaron que la incorporación de diatomita, en suelos arenosos, disminuye el diámetro medio ponderado. Lo cual favorece la formación de agregados pequeños sobre los grandes, afectando negativamente la estabilidad estructural y retención de la humedad en el suelo.

Para el acumulado de agua necesaria para reponer el nivel de 80% de HA fue mayor en el tratamiento de diatomita, siendo estadísticamente similar al testigo con valores de 613 y 596.3 mL (Figura 2).

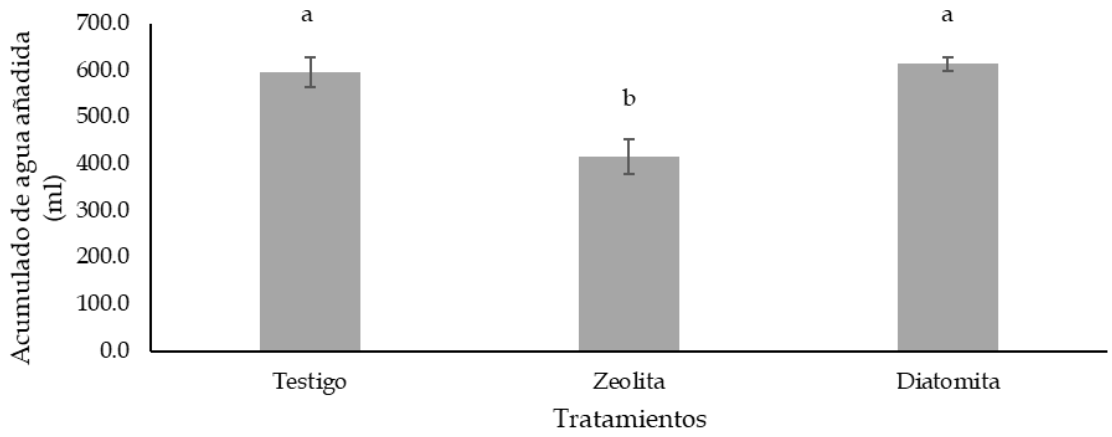


Figura 2. Acumulado de agua añadida (mL) para mantener un 80% de humedad aprovechable en los diferentes tratamientos de enmiendas minerales a suelos de Acolman, Estado de México.

El valor significativamente más bajo fue el del tratamiento de zeolita, consumiendo solo 416 ml, siendo 31.14% y 30.24% menores que lo consumido por el tratamiento de diatomita y el testigo, respectivamente. La zeolita tiene un alto volumen de vacíos que no cambia durante los ciclos de humectación y secado, por lo cual al incorporarse al suelo mejora la retención de humedad (Litaor *et al.*, 2017), como se muestra en la Figura 2.

Los valores más bajos de cobertura vegetal del cultivo de lechuga (Figura 3) estuvieron en el testigo y en el tratamiento de diatomita con valores de 4.58% y 5.23%, respectivamente.

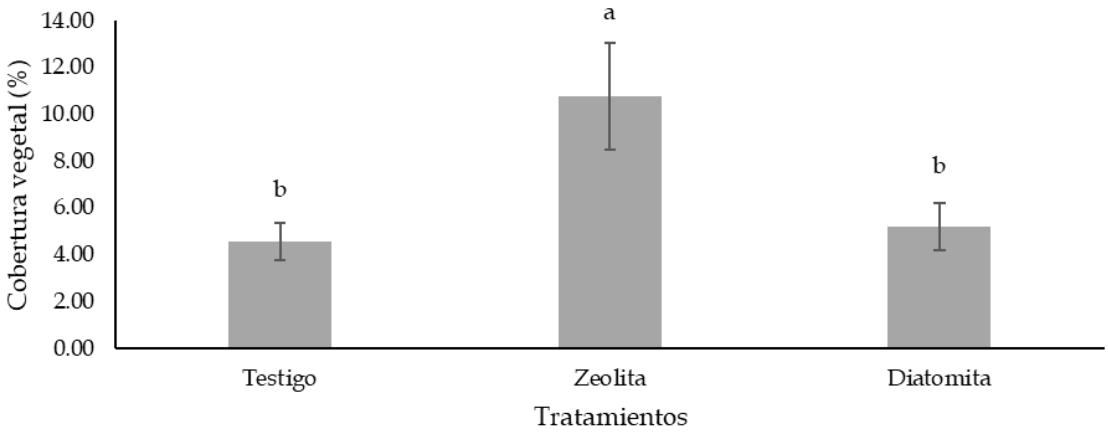


Figura 3. Cobertura vegetal del cultivo indicador en los diferentes tratamientos de enmiendas minerales a suelos de Acolman, Estado de México.

La cobertura vegetal fue mayor en el tratamiento de zeolita con un valor de 10.79% superando en un 51.53% y 57.55% al tratamiento de diatomita y al testigo, respectivamente.

El crecimiento vegetal se ve influenciado positivamente por la presencia de zeolita en el suelo, ya que además de su gran capacidad de retención de humedad (Figura 2), tiene una alta capacidad de intercambio catiónico (100 – 200 cmol(+) kg^{-1}) mejorando el estado nutricional del suelo, así como el crecimiento vegetativo de las plantas (Nakhli *et al.*, 2017). Para el caso de la diatomita, la baja cobertura vegetal, puede deberse a la menor retención de humedad del suelo. Esto afecta directamente los procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas reduciendo seriamente su crecimiento y desarrollo (Bhattacharya *et al.*, 2021).

CONCLUSIONES

La incorporación de zeolita al suelo mejora significativamente la estabilidad de sus agregados y la retención de humedad, lo cual se refleja en una mayor cobertura vegetal. Contrario a lo anterior, la incorporación de diatomita mostró una retención de humedad significativamente menos eficiente que la zeolita y, por consecuencia, una cobertura vegetal menor. Lo anterior sugiere que la diatomita no ofrece ventajas sobre la retención de la humedad del suelo ni en la promoción de la cobertura vegetal, al menos para los suelos bajo agricultura intensiva de Acolman, Estado de México.

BIBLIOGRAFÍA

Aksakal, E. L., Angin, I. & Oztas, T. (2012). Effects of diatomite on soil physical properties. *Catena,* 88(1), 1-5.

Bhattacharya, A. (2021). Effect of soil water deficit on growth and development of plants: a review. *Soil water deficit and physiological issues in plants*, 393-488.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000.

Easlon, E. M. (2015). Canopy Cover (2.0) [Aplicación móvil]. Google Play. https://play.google.com/store/apps/details?id=com.heaslon.canopycover

Garbowski, T., Bar-Michalczyk, D., Charazińska, S., Grabowska-Polanowska, B., Kowalczyk, A. & Lochyński, P. (2023). An overview of natural soil amendments in agriculture. *Soil and Tillage Research,* 225, 105462.

Javaid, A., Munir, N., Abideen, Z., Siddiqui, Z. S., & Yong, J. W. H. (2024). The role of natural and synthetic zeolites as soil amendments for mitigating the negative impacts of abiotic stresses to improve agricultural resilience. *Plant Stress,* 14, 100627.

Le Bissonnais, Y. (2016). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science,* 67(1), 11-21.

Litaor, M. I., Katz, L. & Shenker, M. (2017). The influence of compost and zeolite co-addition on the nutrient's status and plant growth in intensively cultivated Mediterranean soils. *Soil Use and Management,* 33(1), 72-80.

Nakhli, S. A. A., Delkash, M., Bakhshayesh, B. E. & Kazemian, H. (2017). Application of zeolites for sustainable agriculture: a review on water and nutrient retention. *Water, Air, & Soil Pollution,* 228(12), 464.

Ortega, R., Miralles, I., Domene, M. A., Meca, D. & Del Moral, F. (2024). Ecological practices increase soil fertility and microbial diversity under intensive farming. *Science of The Total Environment,* 954, 176777.

Sanchez-Castillo, L., Melendez-Jaramillo, E., Pequeño-Ledezma, M. A., Delgado-Martinez, R. & Kubota, T. (2023). Assessment of the morphological characteristics of native plant species for shallow landslide prevention. *Natural Hazards,* 118(1), 263-276.

Tripathi, S., Srivastava, P., Devi, R. S. & Bhadouria, R. (2020). Influence of synthetic fertilizers and pesticides on soil health and soil microbiology. In Agrochemicals detection, treatment and remediation (pp. 25-54). Butterworth-Heinemann.

Zhang, Y. W., Wang, K. B., Wang, J., Liu, C. & Shangguan, Z. P. (2021). Changes in soil water holding capacity and water availability following vegetation restoration on the Chinese Loess Plateau. *Scientific Reports,* 11(1), 9692.

EVALUACIÓN DE LA BIODISPONIBILIDAD DE METALES PESADOS EN SUELOS DE NARANJA DEL ÁREA CITRÍCOLA DE TAMAULIPAS

María del Pilar Herrera Mendoza[1]; Laura Sanchez Castillo[2]; Edmar Meléndez Jaramillo[2]

[1] Universidad Autónoma de Tamaulipas, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Centro Universitario C.P. 87120, Cd. Victoria, México.
[2] Universidad Autónoma de Tamaulipas, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Centro Universitario C.P. 87120. Cd. Victoria, México.

Correo del autor de correspondencia: a2233018004@alumnos.uat.edu.mx

RESUMEN

La contaminación del suelo por metales pesados ha aumentado en los últimos años debido a diversas actividades antropogénicas, en el caso de los suelos agrícolas, esto se debe principalmente al uso continuo de agroquímicos. Este estudio tuvo como objetivo evaluar su presencia y su relación entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la biodisponibilidad de Cu, Pb, Cd y Cr en seis huertas de naranja Valencia en la zona citrícola del estado. Se realizó un muestreo en dos fases: un muestreo superficial para identificar la presencia de metales y un muestreo de dispersión en varias profundidades y direcciones para evaluar su distribución. Las concentraciones biodisponibles se determinaron con extracción por DTPA, y se analizaron siete propiedades fisicoquímicas del suelo. Se aplicaron correlaciones de Spearman y análisis de correspondencia canónica para estudiar las relaciones entre variables. Se observaron concentraciones mayores de Cu, seguido por Cr, Pb y Cd, sin superar límites máximos permisibles a pesar de que México no presenta normas para fracciones biodisponibles. Propiedades como densidad, porosidad, pH y conductividad eléctrica influyeron significativamente en la biodisponibilidad de los metales.

PALABRAS CLAVE: *Agroquímicos; Biodisponibilidad; Cobre; Extracción DTPA; Suelos*

INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos por metales pesados (MP) es un problema generalizado que afecta de manera anual a millones de hectáreas de tierra en todo el mundo, estos elementos son originados parcialmente por fuentes naturales, pero en la mayoría de los casos su presencia se debe principalmente a actividades antropogénicas como la minería, la metalurgia, la quema de combustibles fósiles y la agricultura (Alengabawy *et al*., 2021). En particular, la agricultura representa una fuente difusora de estos contaminantes en el suelo debido a la implementación de prácticas agrícolas intensivas, como la aplicación continua de agroquímicos sin rotación de cultivos o periodos de descanso. Los fertilizantes, insecticidas, herbicidas y fungicidas contienen en sus formulaciones diversos MP lo que ha dado como consecuencia una continua emisión de elementos como As, Cd, Cu, Mn, Pb y Zn al medio ambiente. El uso continuo de estos productos favorece la acumulación de estos elementos en el suelo debido principalmente a su persistencia e

incapacidad de degradabilidad, por lo que puede conducir a su acumulación hasta niveles que superen los límites máximos permitidos (Salem *et al.*, 2020). Estos contaminantes tienden a concentrarse principalmente en las capas superficiales del suelo, sin embargo, pueden llegar a contaminar aguas subterráneas a través de su migración a las capas profundas mediante la lixiviación del agua de lluvia, por lo cual es de importancia evaluar su dispersión horizontal y vertical en la matriz de suelo.

La presencia de estos contaminantes en los suelos es un fenómeno complejo que está influenciado tanto por las características propias del elemento como por las propiedades fisicoquímicas del suelo. Factores como el pH, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, la temperatura, entre otros, ejercen un papel crucial en los procesos de movilidad, solubilidad y biodisponibilidad de estos elementos contaminantes en el suelo (Salem *et al.*, 2020). Al encontrarse en formas biodisponibles, estos contaminantes pueden ser absorbidos por las raíces de las plantas y posteriormente movilizarse a lo largo de la cadena alimenticia planteando así una seria amenaza a la salud de los seres vivos. Esto supone un riesgo importante para la salud humana ya que una de las principales vías de exposición a estos elementos es la ingesta de alimentos contaminados (Adimalla *et al*., 2019).

Por lo cual, el objetivo del presente estudio fue evaluar la biodisponibilidad y distribución de elementos como el Cu, Pb, Cd, Cr en suelos de cultivo de naranja y evaluar las propiedades fisicoquímicas del suelo que influyen en el proceso de biodisponibilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en el área citrícola de Santa Engracia, ubicada en el municipio de Hidalgo, Tamaulipas, México. Ante la falta de estudios previos que documenten la presencia de contaminantes tipo MP en el área de estudio, se realizó un muestreo exploratorio con base a un esquema de distribución aleatoria simple conforme con lo establecido en la Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016 con el objetivo de identificar y evaluar la presencia de los contaminantes en el suelo, así como la distribución horizontal y posible migración vertical de los contaminantes (SE, 2016).

El muestreo se realizó en seis huertas de cultivo de naranja dulce (*C. sinensis*) y la recolección de las muestras se desarrolló en 2 fases. En la primera fase se recolectaron 10 muestras compuestas de suelo superficial dentro de cada sitio de estudio. En la segunda fase, se implementó un muestreo de dispersión, estableciendo dos zonas de muestreo perimetrales a 10 y 20 m respecto a cada sitio, donde se establecieron cuatro puntos de muestreo distribuidos cardinalmente y en cada punto se tomó una muestra simple a 3 profundidades: 10-20 cm, 20-30 cm y de 30-40 cm. Las muestras fueron recolectadas con palas de acero inoxidable, previamente lavadas con agua, y se almacenaron en bolsas de polietileno previamente etiquetadas. Posteriormente, las muestras fueron trasladadas a la central de laboratorio de la FIC-UAT donde se secaron a temperatura ambiente durante 72 horas y se tamizaron para eliminar residuos orgánicos y partículas gruesas.

La caracterización fisicoquímica del suelo se realizó mediante la evaluación de siete propiedades, siguiendo los métodos descritos en la NOM-021-RECNAT-2000, la cual

establece las especificaciones técnicas de muestreo y análisis de suelos (SEMARNAT, 2002). La textura se determinó mediante el método AS-09 el cual emplea el hidrómetro de Bouyoucos, la densidad aparente (DA) se determinó por el método de probeta, la densidad real (DR) se cuantificó a través del método del picnómetro, la porosidad se evaluó calculando el valor de porosidad total y la compactación del suelo se evaluó en campo utilizando un penetrómetro de Lang instrumento diseñado para medir la resistencia del suelo a la penetración y el cual se expresa en libras de fuerza. El pH del suelo se determinó mediante el método AS-02 usando una suspensión de agua con un potenciómetro Orion Star modelo A211 y se determinó la conductividad eléctrica (CE) en extracto de saturación a través del método AS-18 con un conductímetro Orión modelo 160.

La biodisponibilidad de los MP (Cd, Cr, Cu y Pb) se evaluó mediante el método AS-18 de la NOM-021-RECNAT-2000, el cual emplea el ácido dietilentriaminopentaacético (DTPA) como agente quelante para extraer los metales que están disponibles para la absorción de las plantas y que se encuentran unidos a la materia orgánica. Las concentraciones biodisponibles se determinaron utilizando espectrofotometría de absorción atómica de flama (EAA) con un espectrofotómetro Perkin Elmer.

Para el análisis estadístico se aplicó una correlación de Spearman (con un intervalo de confianza de 95%) para evaluar la relación entre las concentraciones biodisponibles y las propiedades fisicoquímicas del suelo dentro de los sitios. Además, se realizó un análisis de correspondencia canónica para evaluar la relación entre estos elementos y las propiedades fisicoquímicas del suelo fuera de los sitios de muestreo; también se efectuaron ANOSIM de una vía para detectar diferencias estadísticas significativas en las concentraciones de los elementos entre sitios, direcciones y profundidades. Todos los análisis se realizaron en R versión 3.5.3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Metales pesados biodisponibles. El análisis comparativo de las concentraciones biodisponibles promedio mostró la siguiente secuencia decreciente: Cu (3.20-1.65 mg·kg^{-1}) > Cr (0.83-0.15 mg kg^{-1}) > Pb (0.44-0.20 mg kg^{-1}) > Cd (0.23-0.04 mg kg^{-1}) evidenciando una variabilidad significativa entre los sitios de muestreo (Figura 1). El Cu presentó las concentraciones biodisponibles más altas, mientras que el Cd presentó los valores más marginales en todos los sitios de muestreo. Las concentraciones registradas en este estudio se encontraron por debajo de los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 para la clasificación de suelos agrícolas. No obstante, es importante resaltar que actualmente no existen normas o lineamientos que establezcan los LMP para la fracción biodisponible de MP, limitándose a evaluar el contenido total, lo que resulta insuficiente para determinar los riesgos ecológicos y toxicológicos reales.

La predominancia del Cu en todos los sitios evaluados sugiere la existencia de una fuente común de contaminación vinculada principalmente a prácticas agrícolas. Diversos estudios han documentado que numerosos fungicidas e insecticidas empleados en la agricultura contienen altas concentraciones de Cu en sus formulaciones (Rashid *et al*.,

2023), lo que concuerda con la aplicación continua de fungicidas a base de cobre en el área de estudio.

Cuadro 1. Concentraciones de metales pesados biodisponibles en suelo agrícola y comparación con los límites máximos permisibles.

Elemento	Sitios						LMP
	1	2	3	4	5	6	(mg kg^{-1})
Cu	1.65	1.97	3.09	2.02	3.2	1.16	100
Cd	0.07	0.04	0.23	0.2	0.18	0.19	3-5
Pb	0.4	0.34	0.44	0.42	0.28	0.2	100-300
Cr	0.38	0.22	0.26	0.15	0.83	0.77	280

LMP: Límite Máximo Permisible. Los rangos de LMP se tomaron de la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 y NOM 021-SEMARNAT-2002.

Relación entre propiedades fisicoquímicas del suelo y biodisponibilidad de metales. El análisis de correlación de Spearman ($p < 0.05$) reveló correlaciones significativas entre las concentraciones biodisponibles y las propiedades fisicoquímicas del suelo. La porosidad del suelo presentó una correlación negativa con los elementos Cu y Pb y una correlación positiva con el Cr. La DA presentó una correlación positiva con el Cu y negativa con el Cr. Por otro lado, la DR se correlacionó negativamente con el Pb y por el contrario se identificó una correlación positiva con el Cr. Entre las variables evaluadas, el pH destacó como la única propiedad que presentó correlaciones significativas con todos los MP, exhibiendo correlaciones negativas débiles para los elementos Cu y Cr y correlaciones positivas con el Cd y Pb. La CE del suelo presentó una correlación negativa con los elementos Cd y Cr y una positiva con el Pb. Adicionalmente, se identificaron correlaciones positivas significativas entre las concentraciones biodisponibles de Cu-Cd lo que indica que estos elementos proceden de una fuente común de contaminación (Adimalla *et al*., 2019). En contraste se identificó una correlación negativa entre Cr-Pb lo que indica fuentes distintas o procesos competitivos que afectan su biodisponibilidad. Estos hallazgos indican que las concentraciones identificadas en este estudio se correlacionan directamente con las propiedades fisicoquímicas del suelo, las cuales desempeñan un papel importante en los procesos de movilización y biodisponibilidad de los MP, los resultados son consistentes con lo reportado en investigaciones previas (Zúñiga-Vázquez *et al*., 2023; Yang *et al*., 2018).

Distribución y migración de metales pesados biodisponibles en suelos agrícolas y su relación con propiedades fisicoquímicas. El ANOSIM mostró diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre las concentraciones registradas en las direcciones de los sitios 1 y 6, sin embargo, no se observaron diferencias estadísticas significativas para el resto de los sitios ni para ningún sitio en las diferentes profundidades. Por otro lado, el ACC mostró una asociación significativa entre las propiedades fisicoquímicas del suelo y las concentraciones registradas en las diferentes direcciones y profundidades de los sitios 1 y 6. Estos resultados evidencian el papel determinante que desempeñan las propiedades fisicoquímicas del suelo en la biodisponibilidad y migración de MP lo cual

coincide con lo reportado en un estudio sobre las características de migración y distribución de estos contaminantes en suelos afectados por relaves de minería de hierro (Zhang *et al.* 2018).

CONCLUSIONES

Se identificó la presencia de Cu, Cd, Pb y Cr en forma biodisponible en el suelo de cultivo de naranja. Sin embargo, las concentraciones identificadas no superaron los límites máximos permisibles (LMP) para la clasificación de suelo agrícola de acuerdo con las NOM-147-SEMARNAT-2004. Los resultados indican que las propiedades del suelo como la porosidad, densidad aparente y real, pH y conductividad eléctrica influyeron significativamente en la biodisponibilidad de los elementos, tanto en los sitios de estudio como en las áreas de dispersión evaluadas.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al CONAHCYT por la beca otorgada para realizar los estudios de maestría y a la Universidad Autónoma de Tamaulipas.

BIBLIOGRAFÍA

Adimalla, N., Qian, H. & Wang, H. (2019). Assessment of heavy metal (HM) contamination in agricultural soil lands in northern Telangana, India: an approach of spatial distribution and multivariate statistical analysis. *Environ Monit Assess*, 191(246): 15246.

Alengebawy, A., Abdelkhalek, S.T., Qureshi, S.R & Wang, M. Q. (2021). Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. *Toxics* 9(3):1-33.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2021). Superficie estatal por tipo de clima. En: Dirección General de Geografía (Eds) Aspectos geográficos de Tamaulipas. Anuario estadístico y geográfico de Tamaulipas. INEGI. México. pp:10-34.

Rashid, A., Schutte, B. J., Ulery, A., Deyholos, M. K., Sanogo, S., Lehnhoff, E. A. & Beck, L. (2023). Heavy Metal Contamination in Agricultural Soil: Environmental Pollutants Affecting Crop Health. *Agronomy*, 13(6), 1521.

Salem, M. A., Dattatray, K. B., Latif, A. & Samira, M. A. (2020). Assessment of physicochemical properties and concentration of heavy metals in agricultural soils fertilized with chemical fertilizers. *Heliyon* 6, e05224.

SE (Secretaría de Economía). (2016). Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016: Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. México. 1-35p.

SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002) Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000: que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. México, 1-85 p.

Yang, Q., Li, Z., Lu, X., Duan, Q., Huang, L., & Bi, J. (2018). A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment. *Science of The Total Environment* 642:690-700.a

Zhang, X., Yang, H.H. & Cui, Z. (2018). Evaluation and analysis of soil migration and distribution characteristics of heavy metals in iron tailings. *Journal of Cleaner Production* 172:475-480.

Zúñiga-Vázquez, D., Armienta, M.A., Cruz, O., Aguayo, A., Pérez-Martinez, I., & Morales-Arredondo, J. I. (2023). Edaphic properties as pieces of evidence of tailings deposit on soils. *Environ Geochem Health*, 45:9175–9197.

ESTABILIDAD DE AGREGADOS EN DOS SUELOS CONTRASTANTES DE LA REGIÓN DEL LAGO DE TEXCOCO, MÉXICO

Moisés Márquez Velázquez[1]; Santos Martínez Santiago [1]; Sara Monzerrat Ramírez Olvera; Gerardo Sergio Benedicto Valdés[1]

[1] Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco, Montecillo, Texcoco. CP. 56264. Estado de México, México.

Correo del autor de correspondencia: moises.marquez@colpos.mx

RESUMEN

La estabilidad de agregados es clave para la salud del suelo, indicando su resistencia a fuerzas como el estrés mecánico e hídrico. El objetivo de este trabajo fue evaluar la estabilidad de agregados en un suelo bajo labranza de conservación y en un suelo con afectaciones por salinidad de la región de Texcoco. Las determinaciones en ambos suelos fueron, pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), densidad aparente (DA), distribución de agregados y diámetro medio ponderado (DMP). Los resultados mostraron que el suelo afectado por salinidad tuvo mayor pH y CE. El suelo con labranza de conservación presentó 3.5% MO, mientras que el suelo salino tuvo un contenido significativamente menor. La DA fue menor en el suelo bajo labranza de conservación y mayor en el suelo salino. En cuanto a la distribución de agregados, el suelo con labranza de conservación mostró una mayor proporción de agregados medianos a grandes, a diferencia del suelo salino que tuvo más agregados pequeños. Por lo tanto, el DMP es mayor (1.71) en el suelo bajo labranza de conservación, indicando un suelo estable. Por otro lado, el suelo afectado por sales tiene un DMP notablemente menor (0.65), lo que implica una condición de inestabilidad de los agregados y una mayor susceptibilidad a la dispersión. La estabilidad de los agregados se ve seriamente comprometida por la salinidad del suelo, impactando negativamente las propiedades físicas y químicas. Esto se manifiesta en el aumento en la DA, la cantidad de microagregados, pH y CE, mientras disminuye el contenido de MO.

PALABRAS CLAVE: degradación de suelos; salinidad; agregación; labranza de conservación.

INTRODUCCIÓN

Un aspecto fundamental para evaluar la salud de suelo es la estabilidad de agregados, dicha propiedad hace referencia a la resistencia frente a fuerzas externas como el estrés mecánico e hídrico que es sometido un suelo (Rieke *et al.,* 2022). Este fenómeno se ve favorecido por la unión de partículas fundamentales: arena, limo y arcillas por sustancias orgánicas e inorgánicas. Una estructura adecuada mejora la productividad agrícola al evitar la erosión del suelo, conservar la materia orgánica y fomentar la infiltración (Le Bissonnais, 2016; Klute *et al.,* 1986).

Existen elementos o factores los cuales son perjudiciales para la estabilidad entre ellos se puede mencionar una alta mecanización de la agricultura, quema de residuos de cultivos y ensalitramientos (Tarolli *et al.,* 2024). Con la finalidad de mantener una estructura favorable se manejan alternativas como la labranza reducida, uso de enmiendas orgánicas, así como un buen manejo del agua con fines de riego (Liang *et al.,* 2025; Sarker *et al.,* 2022).

La salinidad es una condición que contribuye a la degradación de los suelos, principalmente por el aporte de sodio, el cual genera la dispersión de la arcilla (Luo *et al.,* 2024). Este sodio proviene de los aportes de agua al suelo, ya sea por flujos naturales o por prácticas de riego agrícola, y sus consecuencias incluyen asfixia radicular, toxicidad y estrés hídrico (Tarolli *et al.,* 2024).

La dispersión de los agregados del suelo ocurre cuando las partículas de arcilla se hinchan con fuerza y se separan al humedecerse. Al secarse, el suelo se vuelve denso, terroso y sin estructura. Esta capa densa suele ser impermeable al agua y a las raíces de las plantas (Wiesman, 2009).

El diámetro medio ponderado hace referencia al tamaño de agregados que presenta un suelo, a mayores valores se considera con una mayor estabilidad (Le Bissonnais, 2016). Un aspecto importante de realizar una comparación entre suelos salinos sódicos y suelos bajo agricultura de conservación es resaltar la necesidad de implementar prácticas de conservación de suelos y para ello los valores de referencia en determinaciones analíticas nos ayudan a tomar decisiones. El objetivo de este trabajo fue evaluar la estabilidad de agregados en un suelo bajo labranza de conservación y en un suelo con afectaciones por salinidad de la región de Texcoco.

MATERIALES Y MÉTODOS

De acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002), utilizando un patrón de muestreo de zigzag se colectaron muestras compuestas de suelo, a una profundidad de 0 a 30 cm, bajo un diseño experimental completamente al azar. Se tomaron muestras de un suelo bajo labranza de conservación (19.46763, -98.89568) y de otro con afectaciones por salinidad (19.46568, -98.91734). Ambos sitios se encuentran dentro del área agrícola experimental del Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados.

Las propiedades químicas determinadas fueron: pH y conductividad eléctrica (CE) en un extracto de suelo saturado con agua, en una proporción de 1:2 (Alexakis *et al.,* 2015); materia orgánica (MO) por el método de oxidación húmeda (Walkley y Black, 1934). Las propiedades físicas determinadas fueron: Densidad aparente (DA) por método de terrón (Al-Shammary *et al.,* 2018); textura por método de Bouyoucos (Bouyoucos, 1951); distribución de agregados por el método de tamizado en seco y diámetro medio ponderado (DMP) (Kemper y Rosenau, 1986). Los datos de las propiedades físicas y químicas se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) y los valores promedio se compararon mediante una prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$) con el software estadístico R (versión 3.6.1; Viena, Austria).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El pH del suelo bajo labranza de conservación es neutro (7.26 ± 0.15), mientras que el suelo afectado por salinidad muestra un pH alto (10.32 ± 0.02), indicando una condición alcalina (Sirsat *et al.,* 2017). Respecto a la CE, el suelo con labranza de conservación presenta un valor muy bajo (0.08 ± 0.002 $dS \cdot m^{-1}$), lo que sugiere la ausencia de salinidad, en contraste con el suelo salino que exhibe una CE significativamente elevada (11.70 ± 0.63 $dS \cdot m^{-1}$), confirmando la acumulación de sales. El contenido de MO del suelo varía según el tipo de manejo. Bajo labranza de conservación, se observa un nivel moderado a bueno de MO (3.5 ± 0.2%). Por el contrario, los suelos afectados por salinidad presentan un contenido considerablemente menor (1.08 ± 0.27%). Esta diferencia es crucial, ya que una mayor cantidad de MO se relaciona directamente con una mayor estabilidad de los agregados del suelo debido a que la MO actúa como un agente cementante fundamental en el proceso de formación y estabilización de estos agregados (Ćirić *et al.,* 2013; Sarker *et al.,* 2022). Los resultados de las propiedades evaluadas se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Propiedades de dos suelos contrastantes de la región del lago de Texcoco, México.

Propiedad	**unidad**	**Suelo bajo labranza de conservación**				**Suelo con afectaciones por salinidad**			
		Valor		DE		Valor		DE	
pH	---	7.26	±	0.15	b	10.32	±	0.02	a
CE	$dS \cdot m^{-1}$	0.08	±	0.002	b	11.70	±	0.63	a
MO	%	3.5	±	0.2	a	1.08	±	0.27	b
DA	$Mg \cdot m^{-3}$	1.02	±	0.07	b	1.25	±	0.02	a
DMP	---	1.71	±	0.37	a	0.65	±	0.21	b

CE= Conductividad eléctrica; M.O.= Materia Orgánica; DA= Densidad Aparente; DMP= Diámetro medio ponderado. DE= Desviación Estándar. Medias ± DE con letras diferentes en fila indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

El suelo bajo labranza de conservación muestra una textura franca (39% de arenas, 42% de limos y 19% de arcilla). Mientras que el suelo con afectaciones por salinidad presenta una textura del tipo migajón arenoso (53% de arenas, 35% de limos y 13% de arcilla). La DA del suelo bajo labranza de conservación es relativamente baja (1.02 ± 0.07 $Mg\ m^{-3}$), lo cual es indicativo de una buena estructura y porosidad del suelo (Castellanos *et al.,* 2000). Por otro lado, el suelo con afectaciones por sal presenta una DA más alta (1.25 ± 0.02 $Mg\ m^{-3}$), lo que sugiere una degradación de la estructura del suelo, posiblemente debido a la dispersión de partículas por la alta CE (García- Orenes *et al.,* 2005).

El DMP, que refleja la estabilidad de los agregados, es mayor en el suelo bajo labranza de conservación (1.71 ± 0.37), indicando un suelo estable. En contraste, el suelo afectado por sales tiene un DMP notablemente menor (0.65 ± 0.21), lo que implica una condición de inestabilidad de los agregados y una mayor susceptibilidad a la dispersión (Le Bissonnais, 2016).

Los resultados de la distribución de agregados muestran que el suelo bajo labranza de conservación exhibe una mayor proporción de agregados de tamaño medio y grande predominantemente entre 4.76 mm y 0.5 mm (macroagregados), lo que es indicativo de una buena estructura edáfica y una mayor estabilidad de los agregados. Por el contrario, el suelo afectado por salinidad presenta una distribución sesgada hacia los tamaños de agregados más pequeños (microagregados), con una concentración significativa (cercana al 50%) en la fracción < 0.25 mm y una representación mínima en fracciones mayores.

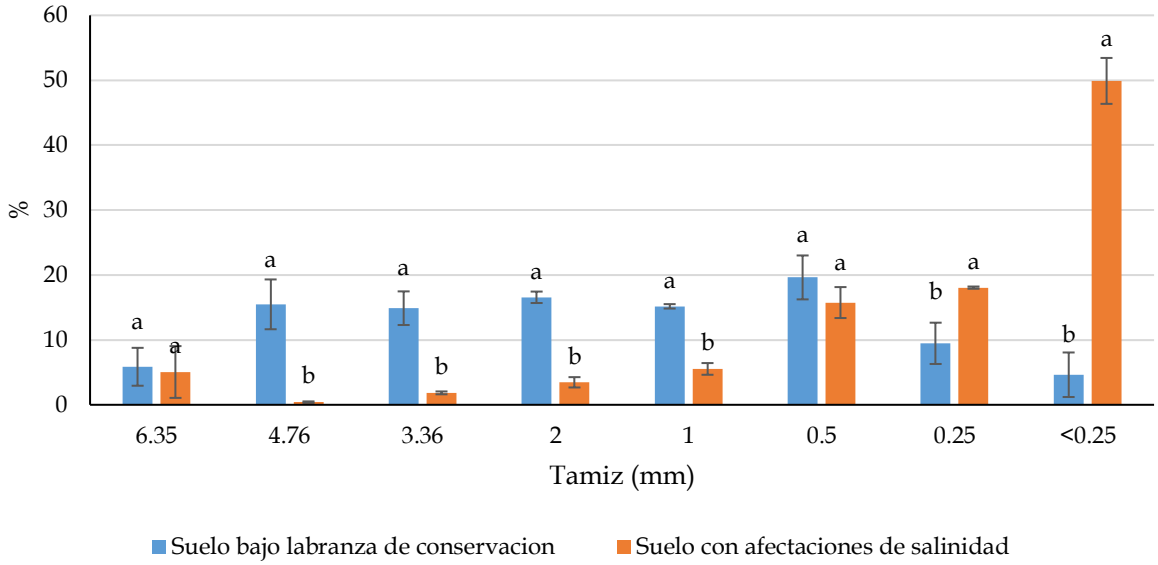


Figura 1. Distribución de agregados de dos suelos contrastantes de la región del lago de Texcoco, México.

Está marcada diferencia en la distribución de agregados (Figura 1) es consistente con los efectos de la sodicidad, donde el exceso de iones sodio promueve la dispersión de las partículas de arcilla, resultando en una degradación de la estructura del suelo y una reducción en la formación de macroagregados estables (Gangwar *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

En la región del Lago de Texcoco, la estabilidad de los agregados se ve seriamente comprometida, principalmente debido a la salinidad del suelo. Esta condición impacta negativamente las propiedades físicas y químicas manifestándose en el aumento en la DA, la cantidad de microagregados, pH y CE, mientras disminuye el contenido de MO.

BIBLIOGRAFÍA

Al Shammary, A. A. G., Kouzani, A. Z., Kaynak, A., Khoo, S. Y., Norton, M. & Gates, W. (2018). Soil bulk density estimation methods: A review. *Pedosphere,* 28(4), 581 596.

Alexakis D., Gotsis D. & Giakoumakis S. (2015). Evaluation of soil salinization in a Mediterranean site (Agoulinitsa district West Greece). *Arab J Geosci.* 8: 1373 1383.

Castellanos, J. Z., Uvalle Bueno, J. X. & Aguilar Santelises, A. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas.

Ćirić, V., Manojlović, M., Belić, M., Nešić, L. & Šeremešić, S. (2013). Effects of land use conversion on soil aggregate stability and organic carbon in different soils. *Agrociencia,* 47(6), 539-552.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000.

Gangwar, P., Singh, R., Trivedi, M. & Tiwari, R. K. (2019). Sodic soil: Management and reclamation strategies. In Environmental Concerns and Sustainable Development: Volume 2: Biodiversity, Soil and Waste Management (pp. 175-190). Singapore: Springer Singapore.

García-Orenes, F., Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Navarro-Pedreño, J., Gómez, I. & Mataix-Beneyto, J. (2005). Factors controlling the aggregate stability and bulk density in two different degraded soils amended with biosolids. *Soil and Tillage Research,* 82(1), 65-76.

Kemper, W. D. & Rosenau, R. C. 1986. Aggregate stability and size distribution. In: Klute A, editor. Methods of Soil Analysis, part 1 physical and mineralogical methods. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America; p. 425 442.

Klute, A. (1986). Methods of soil analysis, part 1, physical and mineralogical methods. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 5.

Le Bissonnais, Y. (2016). Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 67(1), 11–21. https://doi.org/10.1111/ejss.4_12311.

Liang, X., Rehman, S. U., Zhiqi, W., Raza, M. A., Haider, I., Khalid, M. H. B., Saeed, A., Iqbal, Z., Fatima, S., Siddiqa, A., Ansar, M., Ijaz, S. S., & Zhongming, M. (2025). Impacts of Conservation Tillage on Agricultural Land Development: A Review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition,* 25(1), 428–449. https://doi.org/10.1007/s42729-024-02142-9.

Luo, X. J., Zhang, X., Zhang, L., Guo, L. L., Nie, Z. Y., Zhou, J., ... & Yang, F. (2024). Characteristics of clay dispersion and its influencing factors in saline-sodic soils of Songnen Plain, China. Agricultural Water Management, 303, 109033.

Rieke, E. L., Bagnall, D. K., Morgan, C. L., Flynn, K. D., Howe, J. A., Greub, K. L., ... & Honeycutt, C. W. (2022). Evaluation of aggregate stability methods for soil health. *Geoderma,* 428, 116156.

Sarker, T. C., Zotti, M., Fang, Y., Giannino, F., Mazzoleni, S., Bonanomi, G., Cai, Y., & Chang, S. X. (2022). Soil Aggregation in Relation to Organic Amendment: A Synthesis. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(2), 2481–2502. https://doi.org/10.1007/s42729-022-00822-y.

Sirsat, M. S., Cernadas, E., Fernández-Delgado, M., & Khan, R. (2017). Classification of agricultural soil parameters in India. *Computers and electronics in agriculture,* 135, 269-279.

Tarolli, P., Luo, J., Park, E., Barcaccia, G. & Masin, R. (2024). Soil salinization in agriculture: Mitigation and adaptation strategies combining nature-based solutions and bioengineering. *iScience,* 27(2), 108830. https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.108830.

Walkley, A. & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci,* 37:29 38.

Wiesman, Z. (2009). Desert olive oil cultivation: advanced bio technologies. Academic Press.

MOVILIDAD DE METALES EN TECHNOSOLS A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA REPRODUCCIÓN DE PLANTAS EN VIVERO

Lucy Mora Palomino[1]; Luisa Elena Tinoco González[1]; Thalita Fernanda Abbruzzini[1]; Miguel Ángel Delgado Reyes[2]; Javier Tadeo León[1]; Blanca Lucía Prado Pano[1]

[1] Instituto de Geología, Departamento de Ciencias Ambientales y del Suelo, Laboratorio de Edafología Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, C.P. 04510, Cd. Mx, México.
[2] Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural, Secretaría del Medio Ambiente, C.P. 16710, Cd. Mx. México
Correo del autor de correspondencia: lmora@geologia.unam.mx

RESUMEN

El manejo de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es uno de los retos importantes del crecimiento urbano. La construcción de Tecnosoles a partir de residuos sólidos urbanos es una alternativa que permite integrarse a la restauración de suelos degradados, permitiendo recuperar los servicios ecológicos que brinda el suelo. Sin embargo, los RSU pueden contener metales pesados u otros elementos potencialmente tóxicos debido a su origen, en este sentido, es importante conocer la movilidad de estos elementos y definir su riesgo en la construcción de Technosols. El objetivo de este trabajo es evaluar la lixiviación de metales en un Technosol utilizado como sustrato para arboles de cinco especies. La evaluación de la movilidad se llevó a cabo utilizando bolsas con resinas de intercambio iónico colocadas en la salida de lixiviados de las unidades experimentales. Se utilizaron diferentes condiciones de fertilización comparada con el Peat Moss como control. Los resultados mostraron que los valores de pH del Technosol como sustrato disminuyeron, lo que puede comprometer la movilidad de algunos metales como el As y el V que representan los elementos con mayor riesgo de movilidad, mientras que el Cr, Zn y Mn se estabilizaron.

PALABRAS CLAVES: *Compost; Metales pesados; Reproducción de especies arbóreas; Tecnosuelos.*

INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbano genera cada vez más retos sociales, económicos y ambientales. Uno de los principales retos ambientales es la gestión de residuos. En el 2002, la Ciudad de México concentró una población de 9.2 millones de habitantes (INEGI, 2020) y la generación de los Residuos Sólidos Urbano (RSU) entre 2012-2023 fue de 4,407,860 ton/año, de los cuales el 41.5% correspondieron a residuos orgánicos (p. ej. restos de poda, jardinería y alimentos etc.) cuyo destino principal fueron las plantas de compostaje de la ciudad. Por otro lado, 58.5% de los RSU se conformaron por materiales inorgánicos como los residuos de la construcción y demolición (SEDEMA, 2023). La valoración de RSU a partir de la construcción de Technosols es una alternativa cada vez más reconocida ya que permite disminuir la extracción de tierra negra en zonas naturales (Prado *et al.*,

2020). En México, varios trabajos destacan el potencial de los RSU en la construcción de Technosols destinados a la construcción y/o restauración de áreas verdes con diferentes especies vegetales (Abbruzzini *et al.*, 2022; Prado *et al.* 2020). Si bien los Technosols cumplen un papel ecológico en el almacenamiento de agua y la captura de carbono (Abbruzini *et al*., 2022; Deeb, 2020; Seré, 2008); el manejo de algunos RSU puede implicar riesgos de contaminación (Ranaweera, 2023). Aun no es tan claro cuáles son los elementos potencialmente tóxicos que pueden asociarse a los RSU, de modo es necesario evaluar las proporciones de los materiales utilizados en su construcción. Este trabajo evalúa la lixiviación de metales a lo largo de un experimento de reproducción de cinco especies arbóreas durante el primer año de reproducción en vivero, utilizando como sustrato una mezcla de Technosols producido a partir de RSU. El proyecto se desarrolló en el vivero forestal banco de germoplasma y laboratorio de San Luis Tlaxialtemalco, Xochimilco (CDMX) en de colaboración con la Comisión de Recursos Naturales y Desarrollo Rural (CORENARD), el cual busca alternativas sustentables para la reproducción de especies forestales.

METODOLOGÍA

Este trabajo presenta los resultados obtenidos en la un Technosol preparado a partir de mezcla M1 preparada a partir de residuos de concreto fino, astillas de madera de poda y compost, en las siguientes proporciones 30:30:40, respectivamente. El diseño experimental incluyo la mezcla en condiciones de T1 (fertilización ácida), T2 (Fertilización neutra), T5 (Sin fertilización) y T6 (Testigo; Peat Moss). en donde se evaluó el desarrollo de cinco especies arbóreas; 1) Falsa orquídea (*Bauhinia variegata*), 2) Fresno (*Fraxinus udhei*), 3) Níspero (*Eriobotrya japonica*), 4) Oyamel (*Abies religiosa*) y 5) Sauce o ahuejote (*Salix bomplandiana*).

Componentes de los sustratos. Los desechos de concreto se obtuvieron de la compañía Concretos Reciclados, S.A. de C.V., en la Ciudad de México. Las astillas de madera provinieron de los residuos de poda y limpiezas de las áreas verdes de la Alcaldía Xochimilco, y el compost se produjo de los desechos orgánicos de la misma alcaldía.

Análisis fisicoquímicos. La caracterización de Technosols recién preparados se llevó a cabo determinando el pH y la conductividad eléctrica (C.E.) mediante métodos electroquímicos. El contenido de C y N total y C orgánico, utilizando un analizador elemental. El P disponible utilizando un espectrómetro visible, y los metales totales se analizaron mediante FRX. Los cambios en las propiedades químicas de los Technosols durante el crecimiento de las plantas: Después de 6 y 12 meses de iniciado el experimento, se llevó a cabo un muestreo de suelo, en donde se seleccionaron 3 unidades experimentales. De estos se tomó una muestra compuesta para evaluar pH y CE del suelo.

Lixiviación de metales. Durante 12 meses del crecimiento de las plantas se llevó a cabo el monitoreo de los lixiviados de metales, utilizando bolsas con resinas de intercambio iónico instaladas debajo de la zona de raíces. Las resinas se recolectaron y se reemplazaron por nuevas en tres momentos: 1) después de los primeros 4 meses de crecimiento vegetal, 2) en los 4 meses siguientes y 3) en los últimos 6 meses del

crecimiento de las plantas. Los metales se evaluaron a partir de la extracción con una solución de HNO_3 1M y su determinación se llevó a cabo mediante ICP- OES.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los materiales inorgánicos de los RSU son muy alcalinos y contienen bajo contenido de C, N y P disponible (Cuadro 1). El Peat Moss presentó pH ácido y difiere significativamente de la mezcla de Technosol, la cual tiene un pH de 9.55. El Peat Moss presentó contenidos iniciales de C orgánico, N total y P disponible significativamente mayores en comparación con el Technosol, así como diferencias significativas en propiedades como pH y CE ($p < 0.05$) (Cuadro 2).

Cuadro 1. Propiedades fisicoquímicas de los RSU usados para elaborar la Mezcla 1.

Materiales	**pH H_2O**	**CE**	**C total**	**C org.**	**N total**	**P disp.**
		µS cm^{-1}		**%**		**mg kg^{-1}**
Astillas de madera	7.05	1285	38.48	39.16	1.31	50.53
Compost	7.60	6500	22.83	20.90	1.76	159.28
Concreto fino	11.42	1740	1.92	0.18	<LD	7.92
Mezcla 1	9.55	3250	9.51	7.42	0.53	81.44
Testigo Peat Moss	5.00	2750	26.24	25.71	0.52	1035.40

Cuadro 2. Concentración total de metales encontrados en los materiales de construcción y mezcla de Technosols evaluados de manera inicial, para el crecimiento de árboles en etapa de vivero.

Muestra	**As**	**Cd**	**Cr**	**Ni**	**Pb**	**Cu**	**Mn**	**Zn**	**Fe**
					mg kg^{-1}				
Concreto	<LD	<LD	451.25	88.38	<LD	<LD	374.34	48.24	2.39
Compost	<LD		50.18		216.25	55.45	334.31	245.47	1.53
Mezcla 1	<LD	<LD	300.21	<LD	25.49	58.19	323.55	126.47	2.3

**LMP*: Límite Máximo Permisible. Los valores en rojo representan a aquellos que están por encima del LMP según la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004. <LD: menor al límite de detección.

La mayor parte de las concentraciones de metales en los RSU no están por arriba de los límites permisibles (NOM-147- SEMARNAT). El concreto utilizado en la mezcla aporta altas concentraciones de Cr y Mn. Mientras, el compost aportó Cu, Mn y Zn, lo que podría representar un riesgo al ambiente (Cuadro 2). La mezcla conlleva una dilución en las concentraciones de dichos elementos.

Los metales en las resinas de intercambio iónico (Figura 1) muestran el incremento de As y V en los lixiviados en el experimento, mientras que Cr y Mn disminuyen y el Cu se mantuvo constante. Adicionalmente, se observó disminución del pH de 9.5 a 7.5 en los tratamientos a lo largo del experimento, particularmente en los tratamientos T2 y T5.

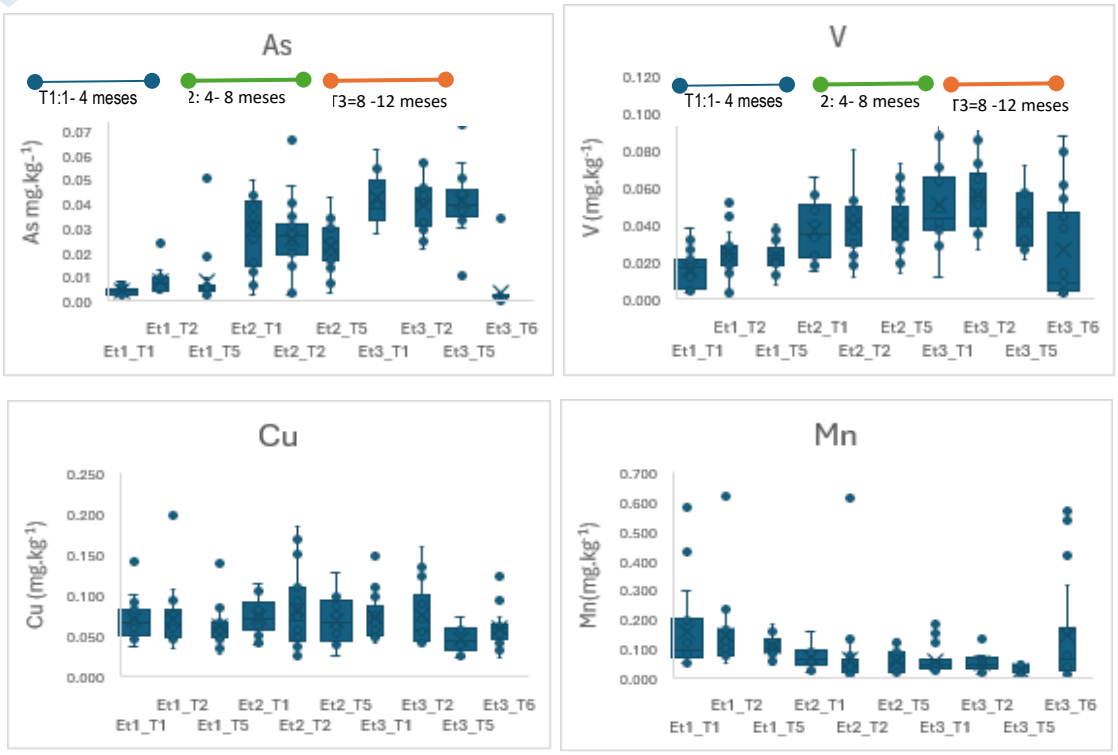


Figura 1. Lixiviación de metales pesados a lo largo del crecimiento de las especies. Los gráficos representan los valores de la media, máximo, mínimo y datos aberrantes de todas las muestras analizadas en las etapas 1, 2 y 3 de los tratamientos T1, T2 y T5 evaluados.

CONCLUSIONES

La construcción de Technosols es una alternativa al uso de RSU que permite disminuir el impacto de los elementos potencialmente tóxicos, en la medida en que se manejen las proporciones de materiales como el compost y los residuos de excavación y construcción. El As y el V podría movilizarse en el ambiente debido a procesos biológicos y a cambios en condiciones de pH del Technosol, mientras que el Cr, Zn y Mn tienden a estabilizarse.

BIBLIOGRAFÍA

Abbruzzini, T.F., Mora, L. & Prado, B. (2022). Evaluation of Technosols constructed with construction and excavation debris for greenhouse production of ornamental plants. *J. Soils Sediments*, 22: 745–756. https://doi.org/10.1007/s11368-021-03112-9.

Deeb, M., Groffman, P. M., Blouin, M., Egendorf, S. P., Vergnes, A., Vasenev, V., Cao, D. L., Walsh, D., Morin, T. & Séré, G.: (2020) Using constructed soils for green infrastructure – challenges and limitations, *SOIL*, 6, 413–434. https://doi.org/10.5194/soil-6-413-2020.

INEGI (2002). Síntesis de resultados. Zona metropolitana de la Ciudad de México: XII Congreso General de Población y Vivienda 2000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825496579/702825496579_1.pdf.

Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004.

Prado, B., Mora, P.L., Abbruzzini, T., Flores, S., Cram, S., Ortega-larrocea, P., Navarrete-S. A. & Siebe, C. (2020). Feasibility of urban waste for constructing Technosols for plant growth. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas. 37. 237-249. https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2020.3.1583.

Prado, B., Palomino, L., Abbruzzini, T., Flores, S., CraM, S., Ortega-larrocea, P., Navarrete-Segueda, A. & Siebe, C. (2020). Feasibility of urban waste for constructing Technosols for plant growth. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37. 237-249. https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2020.3.1583.

Ranaweera, H. M., Grainger, N.C., French, A.D. & Mucalo, M.R. (2023). Construction and demolition waste repurposed for heavy metal ion removal from wastewater: a review of current approaches K. *International Journal of Environmental Science and Technology,* 20:9393–9422 https://doi.org/10.1007/s13762-023-05029-x.

Secretaría de Medio Ambiente. (2023). Inventario de residuos sólidos de la ciudad de México 2023. Secretaría de Medio Ambiente.

Séré G, Schwartz, C., Ouvrard, S., Sauvage, C., Renat, J.C., Morel, J.L. (2008): Soil Construction: a Step for Ecological Reclamation of Derelict Lands. *J. Soils Sediments,* 8(2):130–136.

ANÁLISIS EXPLORATORIO EN UNA TOPOSECUENCIA DEL EJIDO LOS DESMONTES, ACÁMBARO GUANAJUATO, MÈXICO

Fernando Ayala Niño[1]; Sandra Monserrat Barragan Maravilla[1,2]; Gabriel Alejandro Hernández Vallecillo[1,2]; Ana María Muños Flores[1]; Francisco López Galindo[1]

[1] Laboratorio de Edafología Aplicada y Servicios Ambientales, Unidad de Biotecnología y Prototipos, Facultad de Estudios Superiores Iztacala 54090, Tlalnepantla, México.
[2] Colegio de Postgraduados, km 36.5 Carr. México-Texcoco, Col. Montecillo, Texcoco, Estado de México. C.P. 56264. México.

Correo autor de correspondencia: fernando.ayala@comunidad.unam.mx

RESUMEN

El recurso suelo es poco valorado y no suele tener un papel relevante dentro de los programas de manejo de las Áreas Naturales Protegidas (ANP´s), lo que conlleva a la generación de impactos negativos como la disminución en la provisión de servicios ambientales derivados del cambio de uso de suelo. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue caracterizar y profundizar en el conocimiento de los suelos de una toposecuencia del ejido Los Desmontes en Acámbaro, Guanajuato. El sitio está próximo a ser declarado como ANP, con el carácter de área destinada voluntariamente a la conservación. Se describieron 3 perfiles del suelo en un gradiente altitudinal y se determinaron algunas de sus propiedades físicas y químicas. Los resultados muestran que estos suelos poseen características edáficas típicas de los Andosols, derivados principalmente de la historia geológica de la zona. Estos suelos brindan servicios ecosistémicos como la recarga de acuíferos y soporte físico para el establecimiento de la vegetación; no obstante, son muy susceptibles a la erosión bajo prácticas de manejo insostenibles y ausencia de planes de manejo. Se concluye que, en los programas de manejo de las ANP, el recurso suelo debe ser considerado más a fondo para crear y establecer estrategias específicas con base en la diversidad edáfica del sitio.

PALABRAS CLAVE: *Área natural protegida; edafodiversidad; perfiles de suelo.*

INTRODUCCIÓN

El suelo es un cuerpo natural que conforma el hábitat de múltiples organismos y que mantiene los ciclos tróficos, procesos naturales, sistemas ecológicos vitales y servicios ambientales necesarios para garantizar el equilibrio ambiental que sustenta la vida del hombre (CONANP, 2016). Además, provee de una gran variedad de funciones y servicios ambientales, por lo que es considerado como un recurso fundamental en la lucha contra el hambre, la seguridad alimentaria y el cambio climático (FAO, 2025). Sin embargo, la actividad antrópica, principalmente la producción de alimentos está transformando el paisaje mediante cambios en el uso de suelo. En este sentido, las áreas naturales protegidas (ANP´s) y las áreas destinadas voluntariamente a la conservación (ADVC), permiten que las comunidades originarias mantengan, manejen y protejan sus predios de

forma sustentable para la conservación y generación de servicios ambientales. No obstante, el suelo es el recurso que menor importancia adquiere dentro de los programas de manejo de estas áreas.

En la gran mayoría, los inventarios de suelos de las ANP´s se basan en las cartas edafológicas del INEGI, cuyos datos se encuentran desactualizados o con una base cartográfica poco detallada (Lleverino-González *et al.*, 2000). Un ejemplo de ello es el ANP Lago de Texcoco, en el cual el INEGI (2024), a una escala de 1:250 000 reporta la dominancia de Solonchaks; mientras que Barragan-Maravilla *et al.* (2025) a una escala de 1:20 000 demostraron la presencia de ocho grupos de suelo de referencia: Solonetz, Solonchaks, Calcisols, Fluvisols, Phaeozems, Anthrosols, Technosols y Regosols. Esto nos indica la importancia de incluir la caracterización de los suelos en los planes de manejo de las ANPs.

Los ejidatarios de "Los Desmontes" en Acámbaro, Guanajuato, tienen interés en delimitar sus terrenos para destinarlos voluntariamente a la conservación; sin embargo, al contar con pocos recursos, se plantea caracterizar los suelos con base en una secuencia topográfica; es decir, en suelos que se ubican en materiales parentales similares, pero con microclimas y posiciones del relieve diferentes (Krasilnikov, 2011). Con estos estudios es posible obtener información relevante sobre la diversidad de suelos, procesos de degradación y tendencias sobre la evolución del paisaje (Gobin *et al.*, 2000; Huggett, 1998). Adicionalmente, las toposecuencias también son de utilidad como unidad de estudio para comprender cómo determinados factores ambientales y condiciones del paisaje tienen efectos diferentes entre los suelos, en una escala de variabilidad espacial relativamente pequeña. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio es caracterizar los suelos de una toposecuencia del ejido "Los Desmontes", Acámbaro, Guanajuato, con el propósito de generar información que sirva en la delimitación de nuevas áreas destinadas voluntariamente a la conservación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. En abril de 2025 se llevó a cabo un análisis exploratorio en el Ejido Los Desmontes, Acámbaro, Guanajuato, México. Las coordenadas extremas de la localidad son: 19°56´2.0" N, 100°45´35.9" W y 19°54´58.66" N, 100°44´33.30" W. El clima es semicálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw). La precipitación anual 767.4 mm, con 5 meses de lluvia y, una temperatura media anual de 19.4 °C (Sistema Meteorológico Nacional, 2025). Actualmente, en el ejido el uso de suelo es boque de encino y agrícola. De acuerdo con el INEGI (2025), en la región se tienen Umbrisols y Phaeozems.

Selección de sitios. Se seleccionaron tres sitios, considerando principalmente la posición de los suelos en el relieve: parte alta (P1, 2,254 msnm), media (P2, 2,190 msnm) y baja (P3, 2,155 msnm). En cada uno se describió el porcentaje de la pendiente, cobertura vegetal y evidencia de erosión.

Muestreo de suelos. En cada uno de los sitios se describió un perfil del suelo. Se describió su color, estructura, textura al tacto, fragmentos gruesos (%), así como reacciones al HCl y H_2O_2. Además de cada horizonte del suelo se recolectaron 2 kg de muestra, los cuales

se secaron y tamizaron para obtener la fracción de tierra fina (< 2 mm). Posteriormente, se procesaron en el laboratorio de edafología de la Unidad de Biotecnología y Prototipos (UBIPRO) de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM, siguiendo los criterios de la NOM-021-RECNAT-2000.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el ejido "Los Desmontes", las partes más altas se encuentran más conservadas que en las partes bajas, donde el tipo de erosión predominante es la hídrica con evidencias de formación de cárcavas (Figura 1a).

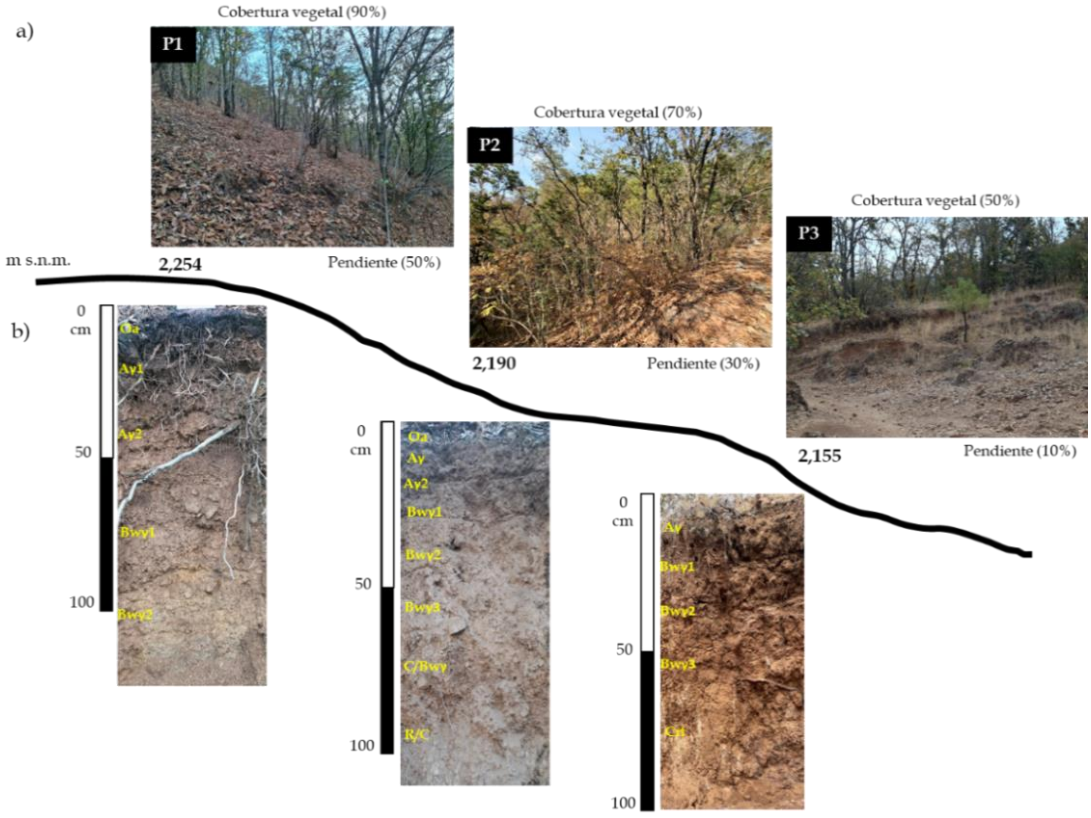


Figura 1. Toposecuencia: a) paisaje y b) perfiles del suelo.

Respecto a la caracterización de los suelos, estos difieren principalmente en color, cantidad de fragmentos gruesos y texturas. En los tres perfiles de suelo, la estructura es de bloques subangulares y suelta, con agregados friables y con moderado desarrollo. Los poros son tubulares e intersticiales, muy finos, finos y abundantes en la superficie. La cantidad de raíces, a pesar de ser abundantes en todos los sitios, cambia en función de la pendiente y de su profundidad; por ejemplo, en P1 se encuentran hasta 170, en P2 a los 65 y en P3 a los 45 cm de profundidad del suelo, lo que indica que la estructura de la vegetación varía en función de la edad de la masa arbórea, albergando individuos de mayor tamaño y una mayor profundidad de las raíces a mayor altitud, en comparación con la vegetación en las partes más bajas donde las raíces aún son más superficiales. Asimismo, en todos los sitios se registró un pH menor a 5, presencia de vidrio volcánico

y nula reacción al HCl. El contenido de materia orgánica (MO) no solo disminuye con la profundidad del suelo, sino que, en las partes bajas, es ligeramente menor que en las partes altas (Cuadro 1).

Con esta información, y de manera preliminar, se tienen designaciones genéticas típicas de suelos de origen volcánico (Andosols) (Figura 1b), contrario a lo que informa el INEGI (2025). En este sentido, algunos de los servicios ecosistémicos que los Andosols nos brindan son: regulación del agua y recarga de acuíferos (por su alta porosidad), almacenamiento de carbono y soporte físico para el establecimiento de la vegetación (profundidad, friabilidad y texturas francas), entre otros (Geissert y Meza, 2016). No obstante, el principal problema de estos suelos es su susceptibilidad a la erosión eólica e hídrica (Krasilnikov *et al.,* 2013).

Cuadro 1. Características de los suelos a lo largo de una toposecuencia, Acámbaro, Guanajuato.

Horizonte	**Prof.**	**Color**		**Textura**	**Fragmentos gruesos**	**MO**	**pH**
	cm	Seco	Húmedo			%	suelo:agua (2:1)
				Parte alta (P1)			
Oa	0-2	-	-	-	-	-	-
Aγ1	0-10	10YR 5/3	10YR 2/1	F	10	3.99	4.53
Aγ2	10-51	10YR 6/4	10YR 3/4	Fr	10	2.87	3.76
Bwγ1	51-121	10YR 5/4	10YR 6/6	Fra	20	1.83	4.31
Bwγ2	121-170	10YR 6/4	10YR 6/6	Fra	40	1.51	4.14
				Parte media (P2)			
Oa	0-3	-	-	-	-	-	-
Aγ1	0-15	10YR 5/3	10YR 3/2	Fr	10	2.79	4.28
Aγ2	15-25	10YR 4/3	10YR 2/2	Fr	10	1.87	4.5
Bwγ1	25-41/45	10YR 7/3	10YR 3/6	Fr	25	1.87	4.38
Bwγ2	41/45-55/61	10YR 7/3	10YR 3/6	R	50	1.83	4.2
Bwγ3	55/61-73/88	YR 5/6	5YR 4/6	R	60	1.87	4.07
C/Bwγ	73/88-110	10YR 7/2	10YR 3/6	R	80	1.87	4.31
R/C	110-145	-	-	-	90	-	-
				Parte baja (P3)			
Aγ	0-13	10YR 5/4	5YR 4/3	Fra	2	2.03	4.57
Bwγ1	13-26	10YR 5/4	5YR 3/4	R	3	1.59	4.54
Bwγ2	26-45	7.5YR 4/4	5YR 3/4	R	5	1.63	4.53
Bwγ3	45-71	7.5YR 4/6	5YR 3/4	R	1	1.22	4.68
Ctγ	71-100	5YR 4/4	5YR 3/4	R	5	1.67	4.36

Nota: F= Franca; Fr= Franca arcillosa; Fra= Franco arcillo arenosa; R= Arcillosa.

CONCLUSIONES

La caracterización preliminar de los suelos en una toposecuencia en el Ejido Los Desmontes, Acámbaro, Guanajuato sugiere que los suelos son de origen volcánico identificados y clasificados como Andosols, sin embargo, es necesario realizar una mayor cantidad de análisis como densidad aparente, retención de fósforo y presencia de materiales amorfos para tener mayor precisión y certeza en la designación del grupo de referencia. Finalmente, los suelos descritos para la región brindan valiosos servicios

ecosistémicos, enfatizando el valor edáfico dentro de los programas de manejo de ANP´s, y como parte del inventario de suelos que se requiere para declarar estas áreas como zonas de conservación. Para dar continuidad al presente trabajo, se llevará a cabo una mayor cantidad de pruebas tanto físicas como químicas con la finalidad de ofrecer una clasificación más detallada con la adición de calificadores complementarios.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del proyecto PAPIME PE207825 a quien agradecemos por el financiamiento otorgado. Asimismo, agradecemos al comisariado del Ejido Los Desmontes por las facilidades otorgadas para la realización del trabajo de campo.

BIBLIOGRAFÍA

Barragan-Maravilla, S.M., Gutiérrez-Castorena, M.C., Hernández-Vallecillo, G.A., Ortiz-Solorio, C.A. & Gutiérrez-Castorena, E.V. (2025). Soils formed from non-organic limnic materials and the anthropic influence on their classification, Texcoco, Mexico. *Catena,* 255 (109041).

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2016). Plan de Acción para el Financiamiento Estratégico 2016-2018 (1ª edición). Sakbe comunicación para el cambio social.

Geissert, D. & Meza, E. (2016). Los suelos del Cofre de Perote: calidad y servicios ecosistémicos. En: Navare, H., Garibay, L., Chamorro, M., Álvarez, L. & Cruz, Y. (Eds.), Universidad Veracruzana (pp. 198-205).

Gobin, A., Campling, P., Deckers, J. & Feyen, J. (2000). Integrated toposequence analyses to combine local and scientific knowledge systems: *Geoderma,* 97(1-2), 103-123.

Huggett, R. (1998). Soil chronosequences, soil development, and soil evolution; a critical review: *Catena,* 32(3-4), 155-172.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI (2025). Sitio web https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/, consulta 20/08/2025.

Krasilnikov, P. (2011). Distribución espacial de los suelos y los factores que la determinan. En P. Krasilnikov, F.J. Jiménez Nava, T. Reyna Trujillo, N.E. García Calderón (Eds.) Geografía de Suelos de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias.

Krasilnikov, P., Gutiérrez-Castorena, M.C., Ahrens, R.J., Cruz-Gaistardo, C.O., Sedov, S. &. Solleiro-Rebolledo, E. (2013). The soils of Mexico. Springer. Dordrecht, Netherlands.

Lleverino-González, E., Ortiz-Solorio, C.A. & Gutiérez-Castorena, M.C. (2000). Calidad de los mapas de suelos en el ejido de Atenco, Estado de México. *Terra Latinoamericana,* 18(2):103-113.

CARACTERIZACIÓN EDÁFICA DEL CERRO DE LA ESTRELLA, CIUDAD DE MÉXICO

Brandon Axel Méndez Flores[1]; Eloísa Adriana Guerra Hernández[1]; Gerardo Cruz Flores[1].

[1] Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Guelatao 66, Ejército de Oriente, Iztapalapa, 09230, CDMX, México.

Correo del autor de correspondencia: mendezfloresaxel@gmail.com

RESUMEN

El Cerro de la Estrella, ubicado al oriente de la Ciudad de México, es un Área Natural Protegida por los bienes ambientales que provee y una zona cultural emblemática. Sin embargo, a pesar de los mecanismos legales para su protección, sufre una degradación acelerada que ha ocasionado la pérdida del 90% de su superficie original ante el cambio de uso de suelo. Este fenómeno ha tenido impactos negativos en la vegetación, en la permeabilidad del suelo que provocan su erosión. Con el propósito de apoyar la actualización de su Programa de Manejo se realizaron muestreos representativos en tres pisos o estratos altitudinales: a) bajo (< 2,330 msnm); b) medio (2,330–2,400 msnm) y c) alto (2,400–2,455 msnm) y se efectuó la evaluación del pH activo, fósforo disponible (Bray I) y nitrógeno total (Kjeldahl). Los resultados encontrados contribuyeron a identificar las zonas prioritarias de restauración. El análisis estadístico, que incluyó el análisis de varianza y el de correlaciones, reveló asociaciones significativas entre altitud y fósforo disponible, así como el pH con el nitrógeno. En el piso altitudinal más elevado se encontró mayor contenido de fósforo (hasta 38 mg kg^{-1}). En el estrato altitudinal medio, se observó una marcada heterogeneidad de valores de los tres parámetros, pero principalmente en N-Total y aquí destacan microambientes como la Barranca y Ladera Moctezuma, con un mayor contenido de nitrógeno y un pH ácido. En el estrato altitudinal bajo se evidenció la deficiencia tanto de fósforo como de nitrógeno. Estos hallazgos resaltan la necesidad de implementar estrategias de gestión adaptadas a la altitud y las características topográficas.

PALABRAS CLAVE: *Áreas naturales protegidas; conservación edáfica; gradiente altitudinal; restauración ecológica; suelos urbanos.*

INTRODUCCIÓN

El suelo proporciona servicios ecosistémicos fundamentales como la regulación climática, hábitat para la biodiversidad, medio de producción de biomasa para la alimentación y belleza paisajística para el bienestar humano (Dazzi y Lo Papa, 2022). En la Ciudad de México (CDMX), más de 50% del territorio pertenece a suelo de conservación, aunque solo 10% de este se localiza dentro de la alcaldía Iztapalapa (Mejía, 2023).

El Cerro de la Estrella (CE), ubicado en el oriente de la CDMX, es un Área Natural Protegida (ANP) con las categorías de Parque Nacional y de Zona Ecológica y Cultural (GODF, 2005). Históricamente, el CE ha experimentado una interacción constante con la actividad humana, desde la época prehispánica, desempeña un papel significativo como centro ceremonial de alta relevancia, específicamente en el Templo del Fuego Nuevo ubicado en la cima del cerro (Montúfar y Torres, 2015). Además, algunas zonas bajas del cerro se han utilizado para actividades agrícolas (INEGI, 1984).

En la década de 1940 se llevó a cabo un proceso de extracción de tezontle y grava (Arana, 2019). Asimismo, los asentamientos irregulares redujeron su superficie original restándole hasta 90% de su superficie original, afectando las condiciones del suelo y provocando erosión, inundaciones y pérdida de biodiversidad (Sánchez, 2021; Montúfar y Torres, 2015).

A pesar de estar protegido por su doble estatus, el Cerro de la Estrella se enfrenta a serios desafíos en materia de gestión ambiental. El único programa de manejo vigente, correspondiente a la Zona Ecológica y Cultural, se encuentra obsoleto y no existe un programa similar para su categoría de Parque Nacional. El programa vigente divide el área en distintas zonas de usos; sin embargo, el área destinada a restauración carece de una diferenciación más allá de sus nombres históricos, lo que dificulta la implementación de estrategias para su conservación o restauración (Cazal, 2022).

El objetivo de esta investigación fue caracterizar el pH activo, fósforo disponible (Bray I) y nitrógeno total (Kjeldahl) de los suelos superficiales en tres pisos o estratos altitudinales en el Cerro de la Estrella, para ampliar la información que pueda ser incorporada en los nuevos programas de manejo de esta ANP.

MATERIALES Y MÉTODOS

En el Cerro de la Estrella ubicado entre las coordenadas extremas son: 19°21’23.05” (488502N) Latitud Norte, 99°06’34.12’’ (2140139W) Longitud Oeste, se hicieron recorridos en el sitio del Templo Fuego Nuevo (Cumbre del CE) y en las Ladera Jazmín, Moctezuma y Zapote y en las Barranca Jazmín, Ladera y Moctezuma y en el Cerrito Maravillas, delimitando estos sitios en tres estratos altitudinales: bajo (< 2,330 msnm), medio (2,330–2,400 msnm) y alto (2,400–2,455 msnm). En cada piso altitudinal se eligieron sitios de muestreo distribuidos en la zona oriente de la zona de recuperación entre los años 2021 y 2024.

Se recolectaron un total de 20 muestras de suelo entre 0 y -20 cm, las cuales fueron secadas al aire, tamizadas con malla de 2 mm y almacenadas en frascos debidamente etiquetados hasta su análisis.

Las determinaciones químicas que se realizaron fueron: el pH, en una suspensión suelo-agua con una relación 1:2. El fósforo disponible se estimó mediante el método Bray I (adecuado para suelos ácidos). El nitrógeno total se determinó mediante el método Kjeldahl, el cual se basa en la transformación del nitrógeno orgánico en amonio para su cuantificación. Todos los análisis fueron realizados por triplicado siguiendo los lineamientos de la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Finalmente, con los datos de los resultados se realizaron análisis estadísticos. Aquellos que no cumplieron los criterios de normalidad y homocedasticidad, fueron transformados logarítmicamente. Después de que los datos se normalizaron, se aplicó un análisis de correlación para determinar las relaciones entre los parámetros químicos que fueron evaluados y las variables ambientales (altitud y temperatura). Para comparar los parámetros entre estratos altitudinales y sitios estudiados (cumbres, laderas y barrancas), se realizó un análisis de varianza (ANOVA). Los resultados obtenidos se representaron en un mapa a escala 1:7000 elaborado con un SIG, que señala la distribución de valores de pH, de nitrógeno y de fósforo normalizados entre 0 y 1 para ser expuestos en histogramas alrededor de la zona de recuperación en la zona de suelo de conservación del Cerro de la Estrella.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis estadístico por parámetro, se observaron los siguientes patrones; a pesar de que el pH es cercano a la neutralidad (6.6 - 7.3) en la mayor parte del polígono, los valores muestran diferencias significativas respecto a la altitud ($p < 0.05$) con valores que clasifican a los suelos entre neutros y alcalinos en los estratos altitudinales bajo y alto, y de suelos moderadamente ácidos en el estrato altitudinal medio. El análisis no mostró diferencias significativas entre sitios.

El fósforo extraíble mostró diferencias significativas entre estratos o pisos altitudinales ($p < 0.05$). Los mayores valores de P-disponible se localizaron en el piso de mayor altitud, mientras que la menor cantidad de P-disponible se encontró en las zonas bajas. A pesar de estas diferencias, el análisis estadístico no mostró diferencias significativas entre sitios. Respecto al N-total, sus valores no presentaron diferencias significativas ni entre pisos altitudinales ni entre sitios.

Las correlaciones de Pearson revelaron significancias estadísticas, siendo las más importantes, la correlación positiva entre altitud y fósforo disponible, la correlación negativa entre altitud y temperatura y la correlación negativa entre pH del suelo y nitrógeno (Cuadro 1).

Cuadro 1: Las correlaciones mostradas son estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

Parámetro	Correlación positiva	Correlación negativa
Altitud	Fósforo (0.69)	Temperatura (-0.82)
pH		Nitrógeno (-0.51)
Temperatura		Fósforo (-0.49)

En el Cerro de la Estrella, los resultados del estudio de pH, P-Bray I y de N-Total de los suelos mostraron una gran heterogeneidad al analizarse en función del material parental del suelo, la temperatura que depende de la altitud y de las actividades antrópicas (Murga, 2021).

Estrato bajo (< 2,330 msnm). Dominan los Andosols derivados de cenizas volcánicas (GODF, 2007). Tiene menor cobertura arbórea y mayor presión antrópica por su fácil

acceso. Los parámetros correlacionados con la altitud fueron la temperatura, cuyo valor es de 24.4 °C. Los sitios de la Ladera Jazmín y la Ladera Moctezuma tienen un pH moderadamente alcalino (7.4-8.5).

El fósforo tuvo los valores más bajos del polígono (1.48 $mg \cdot kg^{-1}$) en la Ladera Zapote; generalmente, los Andosols se caracterizan por la presencia de complejos órgano-minerales de Al y Fe, los cuales fijan el fósforo, disminuyendo su disponibilidad (Bayuelo, 2019). Este estrato altitudinal también presenta los contenidos más bajos de nitrógeno total de hasta 0.1%, clasificados como muy bajos (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2000). La deficiencia de fósforo y nitrógeno sugiere un estado de degradación del suelo en esta zona, la cual presenta la mayor proximidad a los asentamientos urbanos.

Estrato medio (2,330–2,400 msnm). Se tienen Cambisols y Litosols (ahora Leptosols) (GODF, 2007). La cobertura vegetal es de matorral xerófito. En este piso altitudinal es limitado el acceso humano, lo que reduce la presión antrópica directa, propiciando mejores condiciones. El pH fue moderadamente ácido (5.1-6.5), especialmente en la Ladera Moctezuma, en la Barranca Moctezuma el fósforo disponible entre 25–30 mg kg^{-1} y nitrógeno total de 0.47% indicando condiciones edáficas más favorables.

En las Laderas Zapote y Jazmín, se identificaron suelos con bajo fósforo (8 mg kg^{-1}) y nitrógeno (0.06%). El nitrógeno está correlacionado negativamente con el pH, la acidificación en este estrato puede ser explicada por la acumulación de nitrógeno, que representa una fuente importante de protones debido a la nitrificación (Blake, 2005); en estas áreas la cobertura arbórea es mayor, además de que el aporte de sedimentos arrastrado por escorrentía superficial, aumentan la disponibilidad de materia orgánica, y, por lo tanto, de nitrógeno.

Estrato alto (2,400–2,455 msnm). Dominan los Leptosols (antes Litosols), desarrollados sobre roca volcánica (GODF, 2007), los cuales tienen mayor pendiente y suelen tener mayor impacto antrópico debido a la zona arqueológica. En esta zona predomina una temperatura de 22.6 °C.

En sitios como Cerrito Maravillas y Templo Fuego Nuevo mostraron suelos con pH neutro a alcalino (7.4–8.5). Se registraron concentraciones elevadas de fósforo (hasta 38 mg kg^{-1}). El porcentaje de nitrógeno fue bajo, alrededor de 0.16%. Los datos de fósforo, nitrógeno y pH fueron normalizados entre 0 y 1 para ser expuestos en histogramas alrededor de la zona de recuperación en la Figura 1; esto nos permite observar mejor la variación de los parámetros en cada sitio.

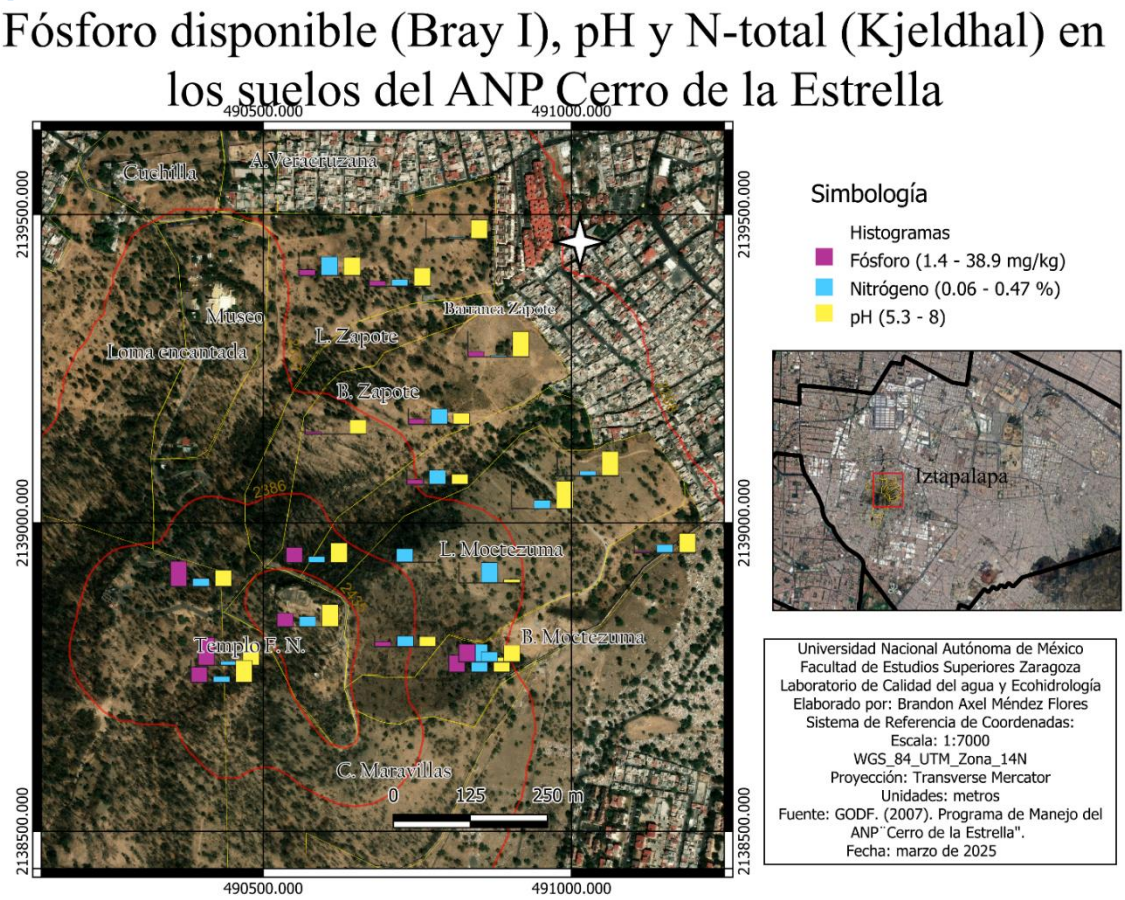


Figura 1. Histogramas de fósforo disponible (Bray I), pH y N-total (Kjeldahl) en los suelos del ANP Cerro de la Estrella.

CONCLUSIONES

El comportamiento de las propiedades analizadas (pH, N y P) de los suelos superficiales del Cerro de la Estrella está influenciado por el gradiente altitudinal. En la parte alta, se tiene la mayor concentración de fósforo, lo cual puede estar relacionado con una menor ocurrencia de actividades humanas. En la parte media, muestra alta heterogeneidad, combinando sitios más fértiles con pH ácido y zonas con valores reducidos de ambos elementos. En la parte baja, se tiene la mayor deficiencia de fósforo y nitrógeno, debido a que es el punto con mayor acceso y afluencia humana.

Las correlaciones entre variables destacan la relación entre altitud, temperatura y fósforo. Los resultados sugieren que las zonas altas y algunas de las medias son prioritarias para conservación, mientras que las zonas bajas y Laderas requieren acciones de restauración enfocadas en aumentar su contenido de materia orgánica, la cual es la principal reserva de P y N en los suelos (Gerke, 2022). Finalmente, se concluye que los factores edáficos, altitudinales, topográficos y antropogénicos deben considerarse al actualizar los planes de manejo de las Áreas Naturales Protegidas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, por brindarme las herramientas académicas y el apoyo institucional para desarrollar este proyecto de titulación. A la Dra. Eloísa por su guía y a mis padres por su apoyo.

BIBLIOGRAFÍA

Arana, R. M. (2019). Descubrimiento y conservación del basamento del templo del Fuego Nuevo. Rutas de Campo. Dirección de Estudios Arqueológicos, INAH.

Bray, R. H. & Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic, and available phosphorus in soil. *Soil Science,* 59, 39–45.

Blake, L. (2005). Acid rain and soil acidification. In D. Hillel (Ed.), Encyclopedia of soils in the environment (pp. 1–11). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00083-7.

Cazal, A., López Levi, L. & McCoy Cador, C. (2022). Parque nacional Cerro de la Estrella: arquitectura institucional para su protección y conservación, En: Rosas A. (Eds.). Parques nacionales. Volumen 1 (1.ª ed., pp. [215-241]). Universidad del Caribe.

Dazzi, C. & Lo Papa, G. (2022). A new definition of soil to promote soil awareness, sustainability, security and governance. *International Soil and Water Conservation Research,* 10, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.07.001.

Gerke, J. (2022). The Central Role of Soil Organic Matter in Soil Fertility and Carbon Storage. Soil Systems, 6(2), 33. https://doi.org/10.3390/soilsystems6020033.

GODF. (2005). Decreto por el que se declara como Área Natural Protegida, bajo la categoría de zona ecológica y cultural, la superficie conocida como "Cerro de la Estrella". Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2 de noviembre de 2005.

GODF. (2007). Acuerdo por el que se aprueba el programa de manejo del área natural protegida con la categoría de zona ecológica y cultural "cerro de la estrella".

Mejía, V. H. (2023). Gobierno y política ambiental en el suelo de conservación de la Ciudad de México (Tesis de licenciatura, UNAM).

Montúfar, A., & Torres, A. (2015). Guía florística del Cerro de la Estrella: Templo del Fuego Nuevo. Secretaría de Cultura.

Murga, H., Coronado, Jorge, M. F., Abanto-Rodríguez, C., & Lobo, F. A. (2021). Gradiente altitudinal y su influencia en las características edofoclimáticas de los bosques tropicales. *Madera y Bosques,* 27(3), e2732271.

NOM-021-RECNAT-2000. SEMARNAT. (2000). NOM-021-RENACT-2002. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estados Unidos Mexicanos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

GÉNESIS DE LOS SUELOS AFECTADOS POR LA EXPLOTACIÓN MINERA DE LA OBSIDIANA EN EL CERRO DE LAS NAVAJAS

Cecilia Gabriela Chávez Hernández[1]; Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena[1]; Carlos Alberto Ortiz Solorio[1]; Bruno Manuel Chávez Vergara[2]

[1] Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km 36.5 Carretera México-Texcoco Montecillo, 56230, Edo. de México.
[2] Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, 04510, México.

Correo del autor de correspondencia: chavez.cecilia@colpos.mx

RESUMEN

Pese a la relevancia que tiene el origen del suelo para comprender su naturaleza y comportamiento, en el país son pocos los estudios centrados en los suelos afectados por la explotación minera de obsidiana. El objetivo de esta investigación fue estudiar el origen de los suelos de las zonas de mayor explotación minera de obsidiana del cerro de Las Navajas, en Hidalgo. Para ello, se realizó una descripción morfológica en siete puntos de muestreo situados a lo largo de la ladera turística del cerro. También se llevaron a cabo pruebas químicas, físicas y micromorfológicas. Los resultados indican que los suelos se formaron de manera natural a partir de rellenos de materiales técnicos de obsidiana. La pedogénesis está relacionada con el grado, la posición de la ladera y el tiempo de perturbación minera. En general, los porcentajes de materia orgánica, nitrógeno y fósforo son bajos, al igual que la capacidad de intercambio catiónico y el porcentaje de saturación. Las texturas son franco limosas y franco arenosas. La explotación minera de la obsidiana está generando Technosols y Cambisols con una incipiente edafogénesis y baja fertilidad del suelo en el cerro de Las Navajas (Hidalgo).

PALABRAS CLAVE: *Desarrollo edáfico; Hidalgo; ladera micromorfología; perturbación*.

INTRODUCCIÓN

El sedentarismo no solo permitió la expansión territorial del ser humano, sino que también generó afecciones en los recursos naturales de la Tierra. Un ejemplo de ello es el suelo, que sufre alteraciones en sus propiedades físicas, químicas y biológicas tras diversas actividades humanas, como la minería, lo que repercute en su desarrollo y, por ende, en el establecimiento de la vegetación asociada. En este sentido, la minería de la obsidiana y la producción de instrumentos con este material lítico en México no solo supusieron procesos importantes para la economía de los pueblos antiguos, sino que también alteraron el paisaje natural del país (Schönleber-Riusech, 2023).

Aunque las investigaciones sobre la génesis del suelo se han centrado en zonas de estudio con diferentes tipos de vegetación, son escasas las que se han orientado hacia los suelos afectados por la explotación minera de la obsidiana. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue estudiar la génesis de los suelos ubicados en las zonas de mayor explotación minera de obsidiana del Cerro de las Navajas (Hidalgo).

MATERIALES Y MÉTODOS

El Cerro de Las Navajas es un centro volcánico riolítico peralcalino, ya extinto, que forma parte del Geoparque Comarca Minera, en el estado de Hidalgo. De manera específica, el Cerro se localiza en el municipio de Singuilucán, en las coordenadas 20°5'7.68"N y 98°33'6.96"O; con altitudes entre 2 400 y 3 200 msnm.

Según Cano y Miquel (2018), la zona se caracteriza por tener rocas basálticas, traquitas, riolitas con obsidiana y escoria del Plioceno tardío y Pleistoceno. Se registra un clima C'b (w1), con temperaturas máximas y mínimas que van desde los 21.9 a los 26.7 °C y desde los 3.7 a los 9.6 °C, respectivamente, y precipitaciones que varían entre 9.6 y 77.3 mm. Schönleber-Riusech (2023) reporta suelos de tipo Cambisol y Technosol entre vegetación de pino y pino-encino. El área se encuentra en la región hidrológica del Pánuco.

Se delimitaron siete puntos de muestreo a lo largo de la ladera turística del cerro de Las Navajas, teniendo en cuenta principalmente los cambios en la vegetación y las zonas de mayor explotación minera de la obsidiana en épocas prehispánicas. A continuación, se tuvieron en cuenta los cambios de altitud y pendiente.

La elaboración de cada uno de los pozos pedológicos se llevó a cabo trazando áreas de 1.5 x 1.5 m². La profundidad de los pozos varió entre 60 y 65 cm, y entre 100 y 105 cm, de acuerdo con la profundidad del material parental o de los rellenos. Posteriormente, se delimitaron los horizontes constituyentes basándose en las características establecidas por la WRB (2022). De cada horizonte se tomaron muestras de entre 1 y 2 kg, cantidad suficiente para llevar a cabo los análisis químicos y físicos en el laboratorio de génesis del suelo del Colegio de Postgraduados (COLPOS), campus Montecillos. Las determinaciones fueron las siguientes: pH (1:2 agua/suelo), materia orgánica (%) por el método Walkley-Black, nitrógeno (%) por el procedimiento micro-Kjeldahl, fósforo (mg $\cdot kg^{-1}$) por el método Bray y Kurtz 1, capacidad de intercambio catiónico y bases intercambiables (potasio, sodio, magnesio y calcio) por el método de acetato de amonio y tamaño de partículas. Todos los procedimientos se extrajeron de Van Reeuwijk (2002). Además, se determinó el porcentaje y el tamaño de los artefactos por cada kilogramo de muestra.

Además de estas pruebas, se realizó un análisis micromorfológico del suelo. Para ello, se utilizaron cajas metálicas tipo Kubiena (10 cm x 5 cm x 8 cm). Las secciones delgadas se describieron utilizando un microscopio petrográfico Olympus. A partir de dicha observación, se determinaron la microestructura, la porosidad, los patrones de distribución de las unidades de fábrica y la materia orgánica (Bullock *et al.*, 1985).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de esta investigación arrojan que en las áreas con mayor altitud (entre 3174 msnm y 3087 msnm), pendientes más escarpadas y con menor perturbación por la extracción y el manejo minero de la obsidiana durante épocas prehispánicas, sí hay formación del suelo.

En los perfiles 1, 2 y 3, a una profundidad de entre 50 y 70 cm, la presencia de un material suave y algo plástico permite que la fauna edáfica y las raíces gruesas, medias y

finas formen agregados de tipo migajón y bloques subangulares (BSA) de tamaño medio a muy grueso, con espacios porosos tubulares y cavidades. Por el contrario, los cuatro perfiles restantes, ubicados entre los 2,968 y los 2,881 msnm, en pendientes más planas y en las zonas con mayor explotación minera de roca pómez y obsidiana, se clasifican como rellenos.

La naturaleza del material que conforma a estos últimos perfiles genera capas con consistencias sueltas y nula plasticidad, donde pese a la presencia de raíces de tamaños muy gruesos a muy finos, la formación de agregados es inexistente y la porosidad es intersticial. Sin embargo, en los horizontes superficiales de los perfiles 6 y 7 se registran agregados de tipo migajón y BSA de tamaño medio, aunque los porcentajes de estos son menores que los de los artefactos reportados, por lo que no se consideran suelos.

Las transiciones abruptas e irregulares, junto con la variabilidad existente entre los colores de las capas que constituyen los siete perfiles, permiten entrever las distintas deposiciones de materiales técnicos que en algún momento fueron extraídos y/o removidos y posteriormente colocados de manera discontinua.

Dado el origen del material, no hay presencia de carbonatos que pudieran reaccionar con el HCl en ninguna de las capas de los perfiles; la ausencia de materiales amorfos también contribuye a la ausencia de reacción con la NaF/fenoftaleína. Los siete perfiles presentaron una ligera o fuerte reacción al H_2O_2.

La abundancia de fragmentos de obsidiana en los perfiles localizados en las partes más altas del cerro de Las Navajas osciló entre el 1 y el 40%, siendo los porcentajes más altos los de las capas subsuperficiales. En los perfiles 4, 5, 6 y 7, los porcentajes de estos artefactos se registraron en las capas superficiales y variaron entre el 10 y el 80%. Los dos últimos perfiles registraron los porcentajes más altos, con tamaños entre 1 y 12 cm y formas de lascas.

En cuanto a las propiedades químicas y físicas, el pH de los suelos varió de ligeramente a fuertemente ácido, con porcentajes de materia orgánica medios a muy bajos, siendo los cinco últimos perfiles los que presentaron mayores carencias. Respecto al porcentaje de nitrógeno y fósforo, estos también fueron bajos. La CIC presentó valores mínimos y máximos de 9.21-10.08 y 46.57-67.95 $cmol(+)kg^{-1}$ suelo, respectivamente. Los PSB variaron entre el 7.2 y el 8.16% y entre el 81.92 y el 95.02%. Cabe destacar que estos últimos valores solo se registraron en las capas más superficiales de los perfiles 1 y 5, donde el catión más abundante fue el calcio. La textura obtenida en los tres primeros perfiles fue franco-limosa, mientras que en el resto fue franco-arenosa.

La microestructura de los suelos a lo largo de la ladera presentó variaciones, de modo que los perfiles 1, 2, 3 y 7 cuentan con una microestructura tanto pedal como apedal. La parte pedal está formada por agregados de tipo migajón, gránulos y BSA, con un desarrollo moderado a fuerte. En los perfiles 1, 2 y 7 es frecuente observar una abundancia de BSA, mientras que en el perfil 3 la abundancia de agregados está dominada por migajones y gránulos. En cuanto a la parte apedal, esta presenta microagregados entre granos, lo que coincide con el resto de los perfiles en los que no hay microestructura pedal.

El tipo de porosidad más común en todas las muestras es el empaquetamiento complejo, aunque es importante señalar que en los perfiles 1, 2 y 3 también hay vesículas, fisuras, cámaras, cavidades y canales. La distribución básica es aleatoria en todos los casos, mientras que la distribución relacionada es enaúlica. En los perfiles 3, 4 y 7 también existe una distribución quitónica y mónica, aunque en menor porcentaje. El material orgánico está compuesto por hojas, tejidos, cortezas, raíces, heces fecales, esporas de hongos micorrizógenos arbusculares e hifas. La mayoría de los órganos vegetales solo se encuentran como fragmentos, con variaciones en el grado de preservación, ya que se trata principalmente de materiales carbonizados.

El desarrollo de los perfiles 1, 2 y 3 está relacionado con la escasa perturbación que se llevó a cabo en las zonas más elevadas del cerro de Las Navajas. Según Ponomarenko (2004), las minas de pozo prehispánicas son menos profundas en las zonas más altas y escarpadas de la zona debido al tipo de yacimiento de la obsidiana, que tras una larga y variada historia volcánica se depositó dentro de un flujo de lava intercalado con capas de riolita o piedra pómez. Por tanto, la obsidiana quedó casi expuesta en las partes más elevadas y fue menos accesible en las zonas planas y de menor altitud, donde se encuentran minas de mayor profundidad.

La composición del material volcánico que constituye la zona y el tipo de vegetación que se establece alrededor permiten explicar las propiedades físicas y químicas de los suelos estudiados. Brilhante *et al.* (2017) mencionan que las riolitas son rocas ígneas ácidas con una constitución mineralógica que incluye cuarzo, feldespatos, biotita, anfíboles y piroxenos, y que su grado de intemperización determina los materiales secundarios constituyentes y el tipo de textura. Si se analiza dicha situación, se puede pensar que, en las zonas de menor perturbación, el material podría sufrir un lento proceso de transformación que permite el registro de texturas franco-limosas. Esta situación contrasta con las zonas de mayor perturbación, donde el material queda expuesto al ambiente y a la intemperización principalmente química con la producción de óxidos.

Por otro lado, la abundancia y el tipo de vegetación establecida en el área de estudio contribuyen a explicar los bajos porcentajes de materia orgánica, nitrógeno y concentraciones de fósforo. Álvarez del Castillo *et al.* (2003) informan de que a altitudes de entre 2,980 y 3,100 metros sobre el nivel del mar hay bosques de encino y pino, un sotobosque dominado por *Baccharis conferta* y *Lupinus camprestri*, y un estrato herbáceo compuesto por Festuca y zacatón. En altitudes más bajas, registran un bosque muy abierto de *Pinus pseudostrobus*, con presencia esporádica de encino, y un estrato herbáceo compuesto por zacatón y árnica. Thiers *et al.* (2014) señalan que las acículas de las coníferas se acumulan sobre la superficie del suelo debido a sus bajas y lentas tasas de descomposición, lo que justificaría los valores obtenidos respecto a las variables mencionadas anteriormente. Esta acumulación es mayor en las partes más altas del cerro, donde la diversidad vegetal es mayor. La alta actividad biológica y la incorporación de materia orgánica generan un incipiente proceso de melanización y formación de agregados migajosos por la alta actividad biológica.

Finalmente, ante la perturbación sufrida desde tiempos precolombinos hasta la actualidad en las zonas de menor altitud, haciendo una clara referencia a la extracción

minera y deposición de la obsidiana, así como a la tala de árboles, la formación de agregados es nula o escasa dificultando el desarrollo de los suelos que sostienen el bosque templado del Cerro de Las Navajas. Es preciso mencionar que en este estudio los suelos también se determinaron como Cambisols y Technosols, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Schönleber-Riusech (2023), pero se enfocaron más a la geografía ambiental y arqueología y poco a generar conocimiento sobre su génesis.

CONCLUSIÓN

Los suelos naturales del Cerro de Las Navajas son de origen volcánico y relativamente jóvenes, donde los procesos de formación como la melanización (actividad biológica y agregados migajosos) y la oxidación de la obsidiana están generando Cambisols. No obstante, la actividad minera de la obsidiana desde tiempos precolombinos favorece la remoción de estos suelos y la posterior adición de material subterráneo sobre estos y a su vez su enterramiento. De modo que la modificación de sus propiedades físicas, químicas y micromorfológicas repercute indiscutiblemente en su desarrollo generando Technosols con una edafogénesis incipiente, pero con alta actividad biológica.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez del Castillo, C., Hernández, J. & Villakamel, A. (2003). Aprovechamiento y manejo de los recursos naturales en El Nopalillo, Hidalgo en A. Montúfar-López Coor., *Estudios etnobiológicos pasado y presente de México* (181-191). INAH.

Brilhante, S.A., Santos, J.C.B.D., Souza, V.S.D., Araújo, J.K.S., Ribeiro Filho, M.R. & Corrêa, M.M. (2017). Weathering of rhyolites and soil formation in an Atlantic Forest fragment in northeastern Brazil, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, *41*, e0160558.

Bullock, P., Federoff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T. & Babel, U. (1999). Manual para la descripción de secciones delgadas de suelos. Colegio de Postgraduados, Edo. de México, México.

Cano, A.C. & Miquel, C.C. (2018). Guía de campo del Geoparque de la Comarca Minera. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

IUSS Working Group WRB. (2022). World Reference base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.

Ponomarenko, A.L. (2004). The Pachuca obsidian source, Hidalgo, Mexico: a geoarchaeological perspective, *Geoarchaeology: An international journal*, *19*(1), 71-91.

Schönleber-Riusech, I.S. (2023). *Alteración antrópica del paisaje por la minería de la obsidiana en Sierra de Las Navajas, Hidalgo. Un estudio desde la geografía ambiental y la arqueología*. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Thiers, O., Reyes, J., Gerding, V. & Schlatter, J.E. (2014). Suelos en ecosistemas forestales en C. Donoso, M.E. González, A. Lara (Ed.), *Ecología forestal. Bases para el manejo sustentable y conservación de los bosques nativos de Chile* (133-178). Ediciones UACh.

Van-Reeuwijk, L.P. (2002). Procedures for soil analysis. 6aed. International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, The Netherlands.

INTERCALACIÓN DE NITRATOS EN ÓXIDOS MIXTOS LAMINARES Mg/Fe/Al PARA QUÍMICA INTERFACIAL DEL SUELO

Iván Ávila Raya[1]; Martha Angélica Lemus Solorio[2]; Alfonso Lemus Solorio[3]

[1] División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 58000 Morelia, México.
[2] Posgrado en Ciencias en Ingeniería Física, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 58000 Morelia, México.
[3] División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 58000 Morelia, México.

Correo del autor de correspondencia: 1578518j@umich.mx

RESUMEN

Los óxidos mixtos laminares *(OML)* derivados de materiales tipo hidrotalcita exhiben efecto memoria: en presencia de aniones en solución acuosa reconstruyen la fase laminar original, intercalando selectivamente dichos aniones en el espacio interlaminar. En este trabajo se promovió la reconstrucción en medio nitrato de *OML Mg/Fe/Al* usando *NAD* (nitrato de amonio disuelto, NH_4NO_3) para incorporar NO_3^- como anión de partida. La intercalación se corroboró por *DRX* (recuperación de la familia 00l, desplazamiento del (003) e incremento de d_{003}) y por *FTIR* (banda ν_3 de $NO_3^- \approx 1380\ cm^{-1}$ y $\delta(H_2O) \approx 1640\ cm^{-1}$), manteniendo las señales del armazón brucítico. La elección del ión NO_3^- facilita intercambios aniónicos subsecuentes y la funcionalización de las galerías sentando bases para aplicaciones en química interfacial del suelo.

PALABRAS CLAVE: *Adsorción selectiva; difracción de rayos X; efecto memoria; espectroscopía infrarroja; intercambio iónico.*

INTRODUCCIÓN

Los óxidos mixtos laminares (OML) de composición Mg/Fe/Al pueden reconstruir su fase hidrotalcítica en solución mediante el efecto memoria, incorporando aniones del medio en el espacio interlaminar; la obtención de OML–NO_3 es estratégica porque NO_3^-, con menor afinidad que CO_3^{2-}, actúa como anión "saliente" y facilita el recambio posterior por especies de mayor carga/afinidad y/o el injerto de funciones orgánicas de interés ambiental (Goh *et al.,* 2009; Park *et al.,* 2007), mientras que la modulación del espaciamiento basal (d_{001}) y de la accesibilidad de galerías favorece procesos de química interfacial y la captura selectiva de aniones (Chaara *et al.,* 2010; Hsu *et al.,* 2007; Lv *et al.,* 2006). En suelos agrícolas y naturales, la especiación aniónica (p. ej., fosfato, sulfato, nitrato, arsenato, cromato) coexiste con carbonatos/bicarbonatos, materia orgánica disuelta y gradientes de pH y fuerza iónica que condicionan movilidad y biodisponibilidad; en este contexto, los OML–NO_3 (Mg/Fe/Al) son candidatos a enmiendas reactivas y plataformas de intercambio/injerto capaces de inmovilizar oxianiones tóxicos y, a la vez, capturar o dosificar aniones de interés agronómico, con la ventaja adicional de su composición basada en cationes abundantes y de baja toxicidad

(Mg, Fe, Al). No obstante, la competencia de CO_3^{2-}/HCO_3^- y la interferencia de sustancias húmicas exigen sólidos preactivados con aniones salientes como NO_3^- que permitan recambios selectivos bajo condiciones realistas de pH e ionicidad del suelo. En este marco, el objetivo del estudio es sintetizar OML–NO_3 (Mg/Fe/Al) por reconstrucción y caracterizarlos por DRX y FTIR para confirmar la recuperación laminar y la intercalación de NO_3^-, evaluando mediante estos marcadores estructurales y vibracionales la preactivación del sólido como plataforma para intercambios e injertos aniónicos con aplicación en suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Reconstrucción en medio nitrato. *OML Mg/Fe/Al* se obtuvieron por calcinación de precursores laminares y se reconstruyeron en soluciones *NAD* (NH_4NO_3) bajo atmósfera controlada para minimizar CO_2 y favorecer la intercalación de NO_3^-.
Difracción de rayos X *(DRX).* Identificación de fase y evaluación de (003), (006), (009) para estimar d_{003} y el orden laminar (*Cu Ka, λ = 1.5406 Å;* barrido típico 5–80° 2θ; paso ~0.02°).
FTIR. Asignación de $\nu(OH)$, $\delta(H_2O)$ y $\nu_3(NO_3^-)$ en *4000–500* cm^{-1} para confirmar la presencia de nitrato interlaminar y el estado del agua interlaminar.
Nota terminológica: *NAD* se usa en las figuras para denotar nitrato de amonio disuelto (NH_4NO_3) como medio/estándar asociado a la reconstrucción en nitrato.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evidencia estructural por *DRX.* Tras el tratamiento en *NAD* los patrones mostraron la recuperación de la familia 00l con desplazamiento en el pico (003) y un incremento de d_{003}, consistentes con la intercalación de NO_3^- en las galerías dadas. La persistencia de (006) y (009) respalda la reconstrucción ordenada del armazón laminar.

Evidencia espectroscópica por *FTIR.* Los espectros revelan $\nu_3(NO_3^-) \approx 1380\ cm^{-1}$ y $\delta(H_2O) \approx 1640\ cm^{-1}$, además de $\nu(OH)$ amplio asociado a capas brucíticas/agua interlaminar. La señal $\nu_2(CO_3^{2-})$ ~870–880 cm^{-1}, cuando aparece, se reduce respecto a materiales carbonatados, lo que concuerda con la preferencia por NO_3^- en el medio de reconstrucción.

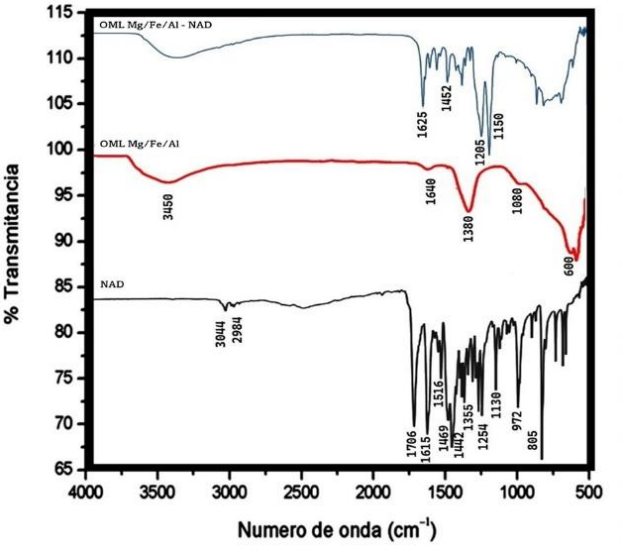


Figura 1. DRX de OML Mg/Fe/Al antes y después de la reconstrucción en medio nitrato (NAD); se indican (003), (006), (009) y el d_{003} correspondiente.

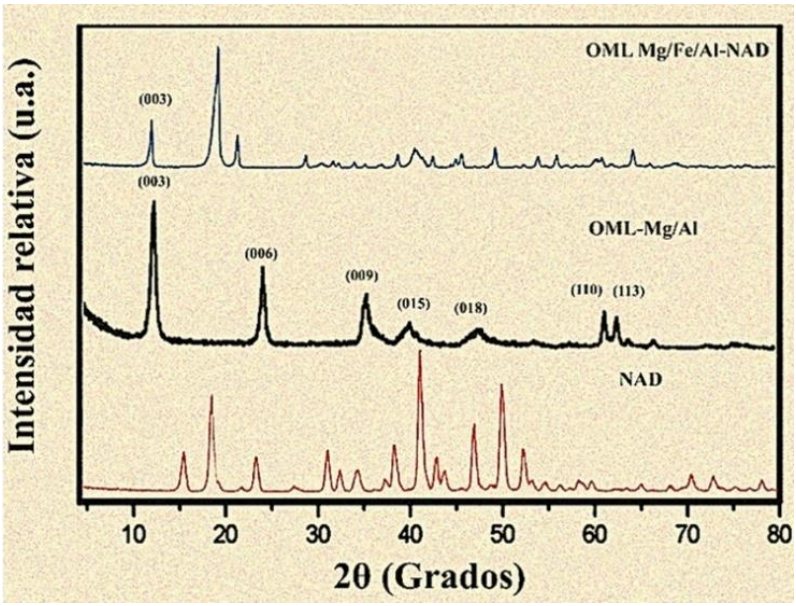


Figura 2. FTIR con ν(OH), δ(H_2O) ≈ 1640 cm^{-1} y $\nu_3(NO_3^-)$ ≈ 1380 cm^{-1}. Condiciones típicas: DRX (Cu Kα, λ = 1.5406 Å; 5–80° 2θ; paso ~0.02°); FTIR (4000–500 cm^{-1}). NAD = nitrato de amonio disuelto (NH_4NO_3).

Implicaciones. Con NO_3^- como anión de partida, el sólido queda preparado para intercambio iónico y funcionalización ulterior (e.g., sustitución por oxoaniones de mayor afinidad), manteniendo accesibilidad de galería y reactividad interfacial adecuadas para escenarios de suelo–agua (Chaara *et al*., 2010; Goh *et al*., 2009; Park *et al*., 2007; Hsu *et al*., 2007).

Cuadro 1. Regiones características y asignación de bandas *FTIR* para *OML Mg/Fe/Al* pre y postreconstrucción/intercalación (valores cualitativos; la posición exacta puede desplazarse según composición y condiciones).

Número de onda (cm^{-1})	**Asignación de bandas**
3400–3600	ν(OH) de capas brucíticas + H_2O interlaminar
3160–3450	Contribuciones M–OH (dependen de composición)
~1640	δ(H–O–H) (agua interlaminar)
~1380	$\nu_3(NO_3^-)$
870–750	$\nu_2(CO_3^{2-})$ (si hubiese carbonato residual)
~1080	M–O/M–O–M o C–O débil (según muestra)
~600	M–O (vibraciones de red)

CONCLUSIONES

Se cumplió el objetivo de sintetizar y caracterizar OML–NO_3 (Mg/Fe/Al) obtenidos por reconstrucción. La evidencia por DRX y FTIR confirmó tanto la recuperación de la fase laminar como la intercalación de NO_3^- en el espacio interlaminar. Este estado preactivado respalda el uso de OML–NO_3 como plataforma para recambio iónico e injerto funcional, al ofrecer una modulación de d_{001} y accesibilidad de galerías coherente con su aplicación en química interfacial y en la captura selectiva de aniones. Como trabajo

futuro, se recomienda cuantificar capacidades y cinéticas de intercambio en matrices reales con competencia iónica, a fin de delimitar la ventana operativa del material.

AGRADECIMIENTO

Se agradece el apoyo de la Facultad de Ingeniería Química, UMSNH.

BIBLIOGRAFÍA

Chaara, D., Pavlović, I., Bruna, F., Ulibarri, M.A. & Barriga, C. (2010). Removal of nitrophenol pesticides from aqueous solutions by layered double hydroxides and their calcined products. *Applied Clay Science*, 50:292–298.

Goh, K.H., Lim, T.T. & Dong, Z. (2009). Enhanced arsenic removal by hydrothermally treated nanocrystalline Mg/Al layered double hydroxides with nitrate intercalation. *Environmental Science & Technology*, 43:2537–2543.

Hsu L-C, Wang S-L, Tzou Y-M, Lin C-F, Chen J-H. 2007. The removal and recovery of Cr (VI) by Li/Al layered double hydroxide (LDH). *Journal of Hazardous Materials*, 142:242–249.

Lv, L., He, J., Wei, M. & Duan, X. (2006). Kinetics of fluoride removal by calcined layered double hydroxides. *Industrial & Engineering Chemistry Research,* 45:8623–8628.

Park, M., Choi, C.L., Seo, Y.J., Yeo, S.D., Choi, J., Komarneni, S. & Lee, J.H. (2007). Reactions of Cu^{2+} and Pb^{2+} with Mg/Al layered double hydroxide. *Applied Clay Science*, 37:143–148.

ARTRÓPODOS, MICOBIOTA DE SUELO Y SU RELACIÓN CON PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS EN UN CAFETAL DE OAXACA

Karina Yunuen García Cardoso[1], Esmeralda Mendoza Solís[1], Gilberto Vela Correa[2], José G. Palacios Vargas[3], Margarita Ojeda Carrasco[3], Blanca Estela Mejía Recamier[3], Judith Castellanos-Moguel[1]

[1] Laboratorio de Micología, Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco. CDMX, México.
[2] Laboratorio de Edafología y Absorción Atómica, Universidad Autónoma Metropolitana. Xochimilco, Calzada del Hueso 1100, Villa Quietud, Alcaldía Coyoacán, CP. 04950. CDMX, México.
[3] Laboratorio de Ecología y Sistemática de Microartrópodos, Facultad de Ciencias, UNAM, CDMX, México.

Correo del autor de correspondencia: mjmoguel@correo.xoc.uam.mx

RESUMEN

La cafeticultura se enfrenta actualmente a una serie de problemáticas económicas y ambientales que ha llevado a la disminución de los recursos y al desinterés en algunas regiones del país. El café bajo sombra, cultivado bajo el régimen de jardines de café, es un reservorio de diversidad de artrópodos y otros microorganismos del suelo que ha sido poco estudiado. El objetivo de este estudio fue determinar la diversidad de artrópodos y hongos, así como su relación con la fertilidad del suelo en la parte baja de una ladera del rancho cafetalero San Nicolás, en San Pedro Cafetitlán, Oaxaca. Se eligió una planta de café como punto central y se colocaron cuatro trampas Pitfall alrededor, orientadas con los puntos cardinales, para la captura de los macroartrópodos. También, se recolectaron dos muestras de suelo, una para la determinación de los parámetros físicos y químicos, y la otra para la extracción de microartrópodos y el aislamiento de hongos microscópicos. Los resultados muestran que el cultivo de café se lleva a cabo mediante un sistema de manejo orgánico que favorece el mantenimiento de diferentes servicios ambientales. Los suelos presentaron valores adecuados de MO, CIC, Nt, Ca^{2+} y Mg^{2+}para el desarrollo de los cafetales en cuanto a fertilidad, así como una diversidad de microartrópodos, representados por arácnidos, miriápodos, ácaros e insectos, estos dos últimos los de mayor abundancia (203 individuos). Respecto a los hongos filamentosos (8 géneros, dos de los cuales están considerados como entomopatógenos) se tiene un total de 2×10^6 unidades formadoras de colonias/g de suelo. El cultivo de café orgánico bajo sombra parece estar en armonía con el ambiente. Se recomienda realizar un monitoreo constante del agrosistema para promover la sostenibilidad a largo plazo y ayudar a mantener el valor cultural y productivo que representa para la comunidad, así como determinar las especies de la mesofauna que pueden ser indicadores biológicos de la salud del suelo

PALABRAS CLAVE: *Cafetitlán; fertilidad; hongos del suelo; mesofauna; microbiota del suelo.*

INTRODUCCIÓN

En México, el cultivo de café es una actividad fundamental desde el punto de vista económico, pero también son reservorios de biodiversidad cuando se cultivan bajo sombra diversificada, lo que se conoce como "jardines de café" (Espejo *et al.,* 2005). Estos se encuentran principalmente en los estados de Chiapas, Veracruz, Puebla y Oaxaca. Sin embargo, el precio internacional del café ha disminuido, por lo que los agricultores están sustituyendo estos jardines de café por cultivos intensivos, lo que conlleva la pérdida de biodiversidad y de aspectos sociales, culturales y ambientales (Hernández y Nava-Tablada, 2016).

En este sentido, los microorganismos y los artrópodos del suelo son una parte fundamental de los agroecosistemas, debido a que contribuyen al ciclo de los nutrientes y son esenciales para la red trófica del suelo. Además, algunos pueden ser utilizados como indicadores de ciertas propiedades del suelo (Díaz-Porres *et al*., 2014).

Dentro del componente biológico del suelo, los artrópodos son el grupo mejor representado y de mayor importancia en la red trófica, por su papel en la descomposición e integración de la materia orgánica en el sistema. Además, junto con los microorganismos, aportan nutrientes a las plantas y a la producción de los ecosistemas terrestres (Palacios-Vargas, 2014).

El objetivo de este estudio fue evaluar la diversidad de artrópodos del suelo presentes cerca de una planta de café, así como su relación con la fertilidad y la micobiota del suelo, en San Pedro Cafetitlán, Oaxaca, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

San Pedro Cafetitlán es una agencia municipal ubicada en la Provincia Fisiográfica Sierra Madre del Sur, en el estado de Oaxaca, México. Se encuentra dentro de los límites del municipio de San Mateo Piñas, pero se considera parte del municipio de San Pedro Pochutla, el cual limita al oeste con el municipio de Pluma Hidalgo. Geográficamente, se encuentra entre los 15°56'13'' N y 96°22'12.00'' O, a una altitud de 1,219 msnm. (SEDESOL, 2012).

Selección del sitio y muestreo de suelo. El rancho de San Pedro Cafetitlán, se localiza en una ladera baja, a una altitud de 1,173 msnm., donde el café (variedad Pluma Hidalgo) crece bajo la sombra de otras especies arbóreas y herbáceas, las cuales se identificaron hasta nivel de género. Posteriormente, se seleccionó una planta de café como punto central de referencia (Figura 1). A su alrededor, se colocaron cuatro trampas pitfall, orientadas con los puntos cardinales. Se tomaron dos muestras de suelo compuestas, de 0 a 20 cm de profundidad, para realizar los análisis físicos y químicos y la otra, para identificar los microartrópodos y la micobiota,

Análisis físicos y químicos del suelo. Los parámetros físicos que se determinaron fueron: la humedad, el color, densidad aparente (Da), densidad real (Dr), porosidad y la textura, mientras que de los químicos fueron: el pH, materia orgánica (MO), nitrógeno total (Nt), la relación C/N, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cationes

intercambiables (Ca^{2+} y Mg^{2+}), todos se realizaron de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000.

Para la extracción de microartrópodos, se empleó el método de flotación con soluciones saturadas de azúcar al 40%, según lo descrito por Snider y Snider en 1997 (Coleman *et al*., 2004). El principio de este método se basa en utilizar un líquido de mayor densidad que los elementos buscados, de modo que estos elementos de menor densidad flotarán hasta la superficie. Posteriormente, la muestra se cuantificó, separó, montó e identificaron los distintos grupos, utilizando claves especializadas.

Los aislamientos de hongos del suelo se realizaron mediante la técnica de placas de Warcup modificada, utilizando agar Rosa Bengala con cloranfenicol. Las placas se incubaron de 7 a 11 días a 28 ºC y se cuantificaron e identificaron las unidades formadoras de colonias (UFC). Para la identificación se utilizaron observaciones microscópicas y claves dicotómicas (Mier *et al*., 2002).

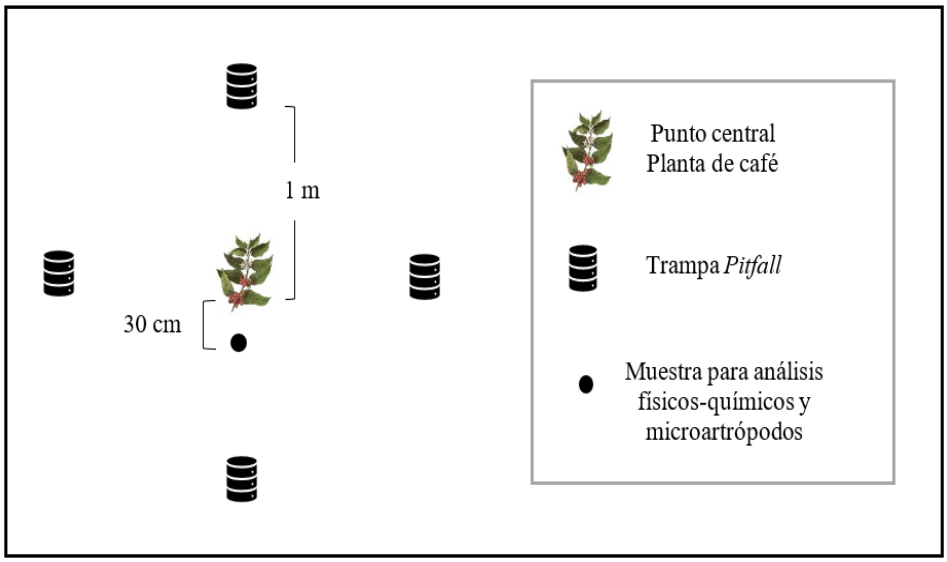


Figura 1. Diseño de muestreo empleado en cada sitio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del sitio de muestreo. La vegetación de sombra comprende: plátano (*Musa* sp.), macahuite (*Ficus* sp.), huanchal (*Cupania* sp.), palo tejón (*Ocotea sinuata*); la de sotobosque son: hoja de sangre (*Hypoestes* sp.), helechos (Pterophyta), chichicaste (*Urtica* sp.), nochebuena (*Euphorbia* sp.), quebraplato (*Ipomea* sp.), y las plántulas son: palo tejón, zacate Merkerón (*Pennisetum* sp.), sensitiva (*Mimosa* sp.), botonchihuite (*Cestrum* sp.).

Caracterización física y química del suelo. Los valores obtenidos corresponden a los adecuados para el desarrollo del café, la clase textural de tipo franco-arenosa y se caracterizan por presentar un porcentaje ideal de arenas, arcillas y limos para una buena retención de agua, alta CIC y buena disponibilidad de agua y aire para las plantas. La humedad es uno de los factores que más influyen en el cultivo de café, y en la presencia de microorganismos López-Carmona *et al*. (2021).

Unidades formadoras de colonias (UFC) y diversidad de macroartrópodos: En el Cuadro 2, se muestran los géneros encontrados y la cantidad de unidades formadoras de colonias (UFC) correspondientes a cada género. En el rancho cafetalero se encontró en porcentajes relativamente bajos, de 14-17%, lo que podría explicar la baja cantidad de hongos microscópicos encontrados y los géneros predominantes, ya que *Aspergillus* y *Penicillium* requieren poca humedad, por otro lado, se encontró gran cantidad de *Trichoderma*, hongo considerado como benéfico. Estos valores podrían estar en función a la textura areno-francosa y franco-arenosa del suelo, además de las altas pendientes, contribuyen a que esta humedad no sea retenida por mucho tiempo en el suelo.

Por otro lado, la relación C/N permite la estimación de los procesos que regulan la disponibilidad de N proveniente de la descomposición de la MO. La relación C/N del sitio se califica como media de acuerdo con la clasificación propuesta por Kass (1996), lo cual se atribuye a un suministro normal de nutrimentos por la descomposición de la MO.

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas del suelo en la ladera inferior del rancho cafetalero San Nicolás en San Pedro Cafetitlán, Oaxaca.

Color		**Humedad**	**Densidad**		**Porosidad**	**Partículas del suelo**			**Textura**
seco	húmedo		aparente	real		Arenas	Arcillas	Limos	
		%	g/cm^3		%	- - - - - % - - - -			
10YR 4/3 Pardo	7.5YR 2.5/2 Pardo muy obscuro	16.9	1.1	2.2	51	67.4	14.8	17.7	Franco arenoso

pH	**CE**	**MO**	**Corg**	**Nt**	**C/N**	**CIC**	**Iones intercambiables**	
							Ca^{2+}	Mg^{2+}
	Dsm	%				Cmol(+) Kg^{-1}	Meq 100g	
5.12	0.5	6.0	3.5	0.3	11.7	32	14.5	0.2

Cuadro 2. Unidades formadoras de colonias en suelo.

Género	**UFC/g^{-1} de suelo**
Aspergillus sp.	850000
Fusarium sp.	250000
Graphium sp.	200000
Isaria sp.	100000
Micelio estéril	150000
Papulaspora sp.	50000
Penicillium sp.	200000
Torula sp.	50000
Trichoderma sp.	200000

En cuanto a los artrópodos del suelo, se obtuvieron un total de 203 individuos, entre los que destacan ácaros y colémbolos, de estos, las familias más representativas fueron: Scheloribatidae con 35 individuos e Isotomidae con 31 individuos. Otros artrópodos presentes incluyen arañas (Theraphosidae, Gnaphosidae), opiliones (Gonyleptidae), y pseudoescorpiones. Los miriápodos son representados por Pauropoda y la familia Geophilidae. De los ácaros se registraron las familias, Histiostomatidae, Alycidae, Cunaxidae, Scutacaridae y Mesoplophoridae. De los insectos destacan colémbolos Isotomidae y Odontellidae y dipluros de la familia Japygidae.

La mayoría de los artrópodos recolectados se consideran benéficos para este agroecosistema cafetalero. Los grupos más abundantes fueron Acari y Collembola, que se han mencionado por otros autores que son los principales representantes de la mesofauna del suelo (Palacios-Vargas y Mejía-Recamier, 2007). Su presencia puede estar determinada por la heterogeneidad de recursos que brinda la variedad de especies vegetales del sombrío en el rancho cafetalero.

Hay poca diversidad y abundancia tanto de ácaros como de colémbolos; lo que se atribuye a que sólo se hizo una colecta y se usó metodología diferente para su extracción. Los colémbolos de la familia Isotomidae son los más abundantes, aunque a nivel de género y especie hay diferencias; ellos reportaron 43 especies de las cinco familias encontradas. En cuanto a los ácaros, en los oribátidos, hay una gran diferencia ya que en los reportados por Bernal-Rojas *et al*. (2009) obtuvieron 33 especies de 14 familias. realizado en cafetales de otra zona en Oaxaca,

CONCLUSIONES

Los resultados indican que la presencia de diversos grupos de artrópodos, componentes de la meso y macrofauna, así como la micobiota pueden estar relacionados con la fertilidad del suelo, lo cual resulta favorable en el establecimiento de los cafetales y su productividad. Los valores de la CIC, MO, y Nt favorecieron la composición de los artrópodos, aunque se requiere de más estudios para determinar las especies de artrópodos, componentes de la mesofauna que podrían ser indicadores de salud y fertilidad del suelo. Este trabajo aporta nuevos registros tanto de ácaros como colémbolos para Oaxaca y especialmente para el área de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Al Sr. Manuel Díaz, propietario de la finca “San Nicolás”.

BIBLIOGRAFÍA

Bernal-Rojas, A., Castaño-Meneses, G., Palacios-Vargas J.G. & García-Calderón, N.E. (2009). Oribatid mites and springtails from a coffee plantation in Sierra Sur, Oaxaca, México. *Pesq. Agropec. Bras. Brasilia,* 44 (8):988-995.

Coleman, D.C., Crossley, D.A. & Hendrix, J.P.F. (2004). Fundamentals of Soil Ecology. Elsevier, Athens, Georgia, EUA.

Díaz-Porres, M., Rionda M.H., Duhour A. E. & Momo, F.R. (2014). Artrópodos del suelo: relaciones entre la composición faunística y la intensificación agropecuaria. *Ecología Austral*, 24: 327-334.

Espejo, A., López-Ferrari,A. R., Jiménez, R. & Sánchez L. (2005). Las orquídeas de los cafetales en México: una opción para el uso sostenible de ecosistemas tropicales. *Revista de Biología Tropical*, 53(1-2): 1-11.

Hernández, M.I. & Nava-Tablada, M.E. (2016). Cafeticultura y uso sustentable de los recursos naturales. El caso del Sitio Ramsar "Cascadas de Texolo y su entorno" en Veracruz, México. El Colegio de Veracruz/Juan Pablos Editor, Ciudad de México, México.

López-Carmona, D., Gallegos, A., Palma-López, D.J., Martín-Morales, G., Barragán-Maravilla, S.M., Hernández-Vallecillo, G. & Bautista, F. (2021). Selección de tierras para el cultivo de café en zonas con información escasa: análisis espacial del territorio y conocimiento local. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(1): 1-17

Palacios-Vargas, J.G. (2014). Biodiversidad de Collembola (Hexapoda: Entognatha) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85: 220-231.

Palacios-Vargas, J.G. & Mejía-Recamier, B.E. (2007). Técnicas de colecta, montaje y preservación de microartrópodos edáficos. Las Prensas de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

Secretaría de Desarrollo Social SEDESOL. (2012). Atlas de Riesgos del Municipio de San Pedro Pochutla.

BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON ACEITE LUBRICANTE USADO MEDIANTE UN EXTRACTO EN POLVO DE *Leonotis nepetifolia* Y VERMICOMPOST

Mayra Luisa Contreras Ramírez[1]; Verónica Ávila Vázquez[1]; Miguel Mauricio Aguilera Flores[1]

[1] Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Zacatecas, Instituto Politécnico Nacional, Blvd. Del Bote 202, Cerro del Gato, Ejido La Escondida, Col. Ciudad Administrativa, 98160, Zacatecas, México.

Correo del autor de correspondencia: mcontrerasr1700@egresado.ipn.mx

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia del extracto enzimático de *Leonotis nepetifolia* en la biorremediación de suelos contaminados con aceite lubricante usado, analizando la influencia del pH y la temperatura, así como su efecto combinado con bioestimulación mediante vermicompost. Se plantea la hipótesis de que la aplicación del extracto bajo condiciones óptimas mejora la remoción del contaminante, alcanzando valores dentro de los límites máximos permisibles (LMP) establecidos por la normativa ambiental vigente. El extracto mostró una actividad enzimática máxima de 29.059 ± 1.221 U g^{-1} a pH 4.6 y temperatura ambiente. El máximo porcentaje de hidrólisis alcanzado en los ensayos fue de 42.039 ± 0.5% a 30 °C y 3 h 30 min., mientras que en los tratamientos de remediación se logró una remoción del contaminante de 76.902 ± 0.416 % en 90 días, cuando se combina con vermicompost. Solo el tratamiento asistido con vermicompost (Exp. E+V) y con pH del suelo modificado cumplió con el LMP, registrando una concentración remanente de 2 309.741 ± 0.416 mg·kg^{-1}, por debajo del límite normativo. Estos resultados demuestran que *Leonotis nepetifolia* tiene potencial como fuente enzimática sostenible para la remediación de suelos contaminados con aceite lubricante usado, además de contribuir al control de una especie exótica invasora.

PALABRAS CLAVE: *Actividad enzimática; especie exótica-invasora; hidrólisis enzimática; humus de lombriz.*

INTRODUCCIÓN

La contaminación de suelos por aceite lubricante usado representa un problema ambiental debido a su alta estabilidad, toxicidad y capacidad de bioacumulación. La biorremediación enzimática ha emergido como una alternativa sostenible y económica frente a los métodos fisicoquímicos convencionales, destacándose por su eficiencia y menor daño al sitio (Salimnezhad *et al.*, 2021).

El uso de extractos enzimáticos derivados de especies vegetales se ha propuesto como una estrategia para acelerar la degradación de contaminantes. Particularmente, las especies exóticas invasoras ofrecen una doble ventaja: su erradicación para control ambiental y la valorización de biomasa asequible para la obtención de enzimas. Tal es el caso de la Bola africana (*Leonotis nepetifolia*), cuyas semillas contienen entre 28 y 37 % de

aceite, principalmente ácidos grasos insaturados y saturados (Marreno *et al.,* 2015). Esta composición indica un potencial para la producción de enzimas hidrolíticas con aplicación en biorremediación (Santos *et al*., 2013). Sin embargo, la aplicación de estos extractos en suelos contaminados con derivados de hidrocarburos, especialmente aceite lubricante usado, aún es limitada y requiere mayor validación experimental.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolección de *Leonotis nepetifolia* y muestreo de suelo. La especie se identificó en varios sitios del Estado de Zacatecas. Se seleccionaron racimos maduros de 5 a 7 cm de diámetro, con color marrón-amarillo en la parte superior. Las semillas se recolectaron agitando los racimos y se tamizaron manualmente para eliminar impurezas. El muestreo de suelo se realizó en un terreno de uso residencial sin contaminación aparente en Guadalupe, Zac. (22°45'48.8'' N y 102°29'57.4'' O). Conforme a la NOM-021-SEMARNAT-2000. Se tomaron ocho submuestras de 300 g cada una y se homogeneizaron para conformar una muestra representativa utilizada en la remediación.

Ensayos de actividad e hidrólisis enzimática. Se realizó el extracto de *Leonotis nepetifolia* a partir del método de Avelar *et al.* (2013) con modificaciones. Se molieron 40 g de semillas y 50 mL de acetona fría (4°C) en una licuadora convencional. La pasta formada se agitó magnéticamente (700 rpm y 4 °C) durante 16 h, posteriormente se filtró al vacío y se desecó por 24 h. El extracto seco se tamizó para obtener partículas < 125 µm y se almacenó a 4 °C.

La actividad enzimática se evaluó a distintos pH (4–8) para determinar la condición en la que presentaba mayor actividad enzimática. Se siguió la metodología descrita por Santos *et al*. (2013), con modificaciones. En cada ensayo se mezclaron 5 mL de emulsión (50 g de aceite de oliva en 150 mL de goma arábiga), 5 mL de buffer y 0.1 g de extracto en polvo. La mezcla se incubó 5 min a temperatura ambiente, se detuvo con 10 mL de etanol y los ácidos grasos liberados se titularon con NaOH 0.02 M hasta pH 11. La actividad enzimática se calculó con la Ecuación 1 (Tavares *et al.,* 2018).

$$Actividad\ Enzimática\ (U/g) = \frac{10^6 \times (V - V_i) \times M_{NaOH}}{t \times m} \quad \ldots Ec.1$$

Donde V es el volumen usado en la titulación (L); V_i es el volumen usado en el control (L); M_{NaOH} es la molaridad real de la solución (mol/L); t es el tiempo de la reacción (min) y m es la masa exacta del extracto (g).

Los ensayos de hidrólisis enzimática se realizaron para evaluar el efecto de la temperatura sobre la actividad del extracto. En matraces Erlenmeyer se mezclaron 5 g de aceite de oliva, 45 mL de buffer y 2 g de extracto en polvo. Las reacciones se llevaron a cabo con agitación magnética constante (1000 rpm) durante 3 h 30 min, variando la temperatura. Cada 30 min se tomó una alícuota de 1 g, que se procesó para detener la reacción y titular los ácidos grasos liberados según el método descrito. El porcentaje de hidrólisis enzimática se calculó con la Ecuación 2 (Santos *et al.* 2013).

$$Hidrólisis\ enzimática\ (\%) = \frac{V_{NaOH} \times 10^{-3} \times M_{NaOH} \times MM}{Wt \times f} \times 100 \quad \ldots Ec.2$$

Donde V_{NaOH} es el volumen usado en la titulación (mL); M_{NaOH} es la molaridad real de la solución (mol/L); *MM* es la masa molar promedio de los ácidos grasos presentes en el sustrato utilizado (g·mol); *Wt* es la masa de la muestra analizada (g) y *f* indica la fracción de aceite presente al inicio de la reacción (adimensional).

Ensayos de remediación. El suelo muestreado se contaminó artificialmente con aceite lubricante usado a una concentración de 10,000 mg·kg^{-1} base seca. Se prepararon tratamientos de 50 g de suelo y se establecieron tres tratamientos de remediación durante 90 días: 1) Control Extracto (Ctrl. E), 2) Control Vermicompost (Ctrl. V) y 3) Experimental (Extracto + Vermicompost, Exp. E+V). El extracto se aplicó al 10% en las condiciones ideales de pH y temperatura. El vermicompost comercial se utilizó a una concentración de 100 g·kg^{-1}. Los ensayos se evaluaron bajo dos condiciones de pH: el característico del suelo (7.76) y uno ácido (pH de 4.6). La cantidad remanente de aceite lubricante usado se determinó por extracción Soxhlet, siguiendo la norma mexicana NMX-AA-134-SCFI-2006, y usando diclorometano como solvente. El porcentaje de remoción se calculó con la Ecuación 3.

$$Remoción\ de\ aceite\ lubricante\ usado\ (\%) = \frac{C_i - (C_f - M_e)}{C_i} \times 100 \quad \ldots\ Ec.3$$

Donde C_i es el aceite lubricante usado inicial (mg/kg de suelo contaminado); C_f es el aceite lubricante usado extraído (mg/kg de suelo contaminado) y M_e es el material extraíble en el suelo (mg/kg de suelo no contaminado).

Análisis estadístico. Los datos se analizaron mediante estadística descriptiva, reportándose la media aritmética y desviación estándar con tres réplicas independientes por experimento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Influencia de pH y temperatura en el uso del extracto de *Leonotis nepetifolia*. Se determinó que el extracto de *Leonotis nepetifolia* presentó su mayor actividad enzimática de 29.059 ± 1.221 U g^{-1} en un medio ligeramente ácido (pH 4.6). Sin embargo, esto no implica que en condiciones con mayor grado de acidez se incremente la actividad. Esto se puede visualizar en la Figura 1(a), donde el extracto mostró una dependencia típica del pH, la cual, de acuerdo con Bisswanger (2019) la actividad de la mayoría de las enzimas sigue una curva en forma de campana, aumentando desde valores bajos en condiciones ácidas (pH 4), alcanza un máximo en lo determinado como un "pH ideal" (pH 4.6) y posteriormente disminuye progresivamente en medios alcalinos (> pH 6). Un comportamiento similar fue determinado por Santos *et al.* (2013), en donde reportaron que el extracto enzimático de *Ricinus communis* L. mostró su máxima actividad (487.8 U g^{-1}) en condiciones ligeramente ácidas (pH 4.5), mientras que, a otros pH, la actividad disminuyó drásticamente a 97.56 U g^{-1} en pH 6 y 48.78 U g^{-1} en pH 8.

La influencia de la temperatura se evaluó mediante ensayos de hidrólisis enzimática en el pH ideal. De acuerdo con los resultados de la Figura 1(b), a temperaturas inferiores a 40 °C no se observaron variaciones considerables respecto a su comportamiento, alcanzándose un porcentaje final de 42.039 ± 0.5% en 3 h y 30 min. Por otra parte, al elevar la temperatura de operación a 50 y 60 °C, la actividad disminuyó alrededor de un 6 %,

con un valor final de 35.704 ± 0.86%. Esta reducción se atribuye a la naturaleza proteica de las enzimas, ya que son termosensibles y se desnaturalizan con el aumento de temperatura, perdiendo su capacidad hidrolítica (Bisswanger, 2019). Cada extracto enzimático posee condiciones óptimas específicas, aunque diversos autores coinciden en que suelen ser estables en rangos de pH y temperatura entre 4.0 y 9.0, y 25 y 60 °C (Tavares *et al.*, 2018).

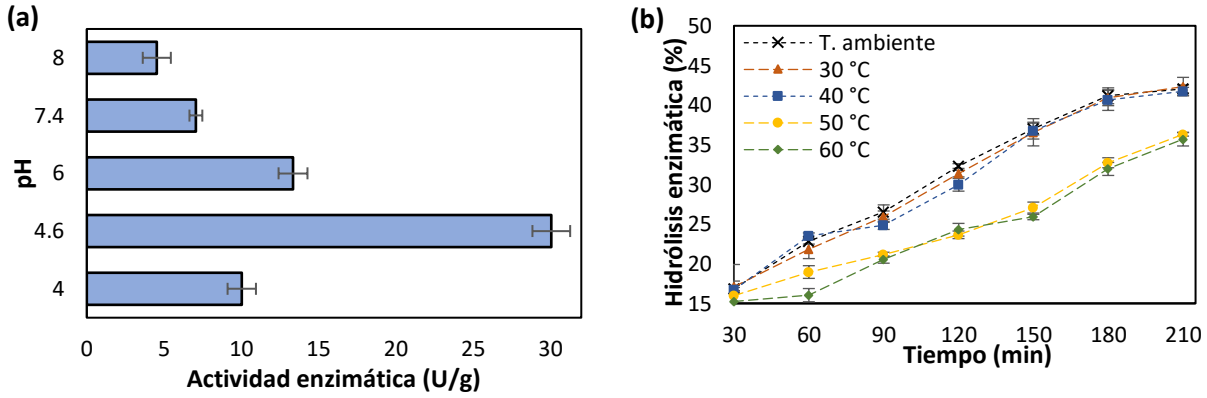


Figura 1. Comparación de la actividad e hidrólisis enzimática del extracto de *Leonotis nepetifolia:* a) empleando diferentes condiciones de pH y b) variación de la temperatura.

Remoción de aceite lubricante usado en suelo. La evaluación del pH en los tratamientos de biorremediación y bioestimulación permitió analizar el comportamiento del extracto de *Leonotis nepetifolia* en suelos ligeramente ácidos o alcalinos. Aunque se aplicó en su condición ideal (pH 4.6) y temperatura ambiente, la eficiencia dependió de la adaptabilidad del extracto al pH del suelo. Como se observa en la Figura 2a, el extracto mantuvo actividad tanto en el suelo modificado como en el pH característico del suelo (7.76). No obstante, la mayor remoción se logró en suelo ajustado a pH 4.6 y asistido con vermicompost (Exp. E+V), alcanzando una remoción del contaminante de 76.902 ± 0.416% en 90 días, lo que representó un incremento del 8.048 % respecto al suelo en su condición natural.

A pesar de que los tratamientos control con vermicompost (Ctrl. V) y extracto (Ctrl. E) lograron de forma individual remociones superiores al 50%, solo el tratamiento experimental (Exp. E+V), aplicado en el pH ideal del suelo, cumplió con el LMP establecido por la NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 para el tipo de suelo muestreado, alcanzando una concentración remanente de 2 309.741 ± 0.416 $mg \cdot kg^{-1}$ de aceite lubricante usado, como se muestra en la Figura 2b.

Sin embargo, al comparar estos resultados con los obtenidos por Aguilera *et al*. (2022), se observa que el extracto enzimático de *Ricinus communis* L. (pH 4.5 y 37 °C) alcanzó una remoción del 94.26 ± 1.91% en aproximadamente la mitad del tiempo requerido en este estudio (49 d). Esta diferencia puede atribuirse a su mayor actividad enzimática reportada en 64.8 U g^{-1} (Tavares *et al.*, 2018) y una hidrólisis de 99.78±0.5%. Estos resultados confirman la relación directa entre una mayor actividad e hidrólisis enzimática y la eficiencia de remoción, resaltando el potencial de optimización del extracto de *Leonotis nepetifolia*.

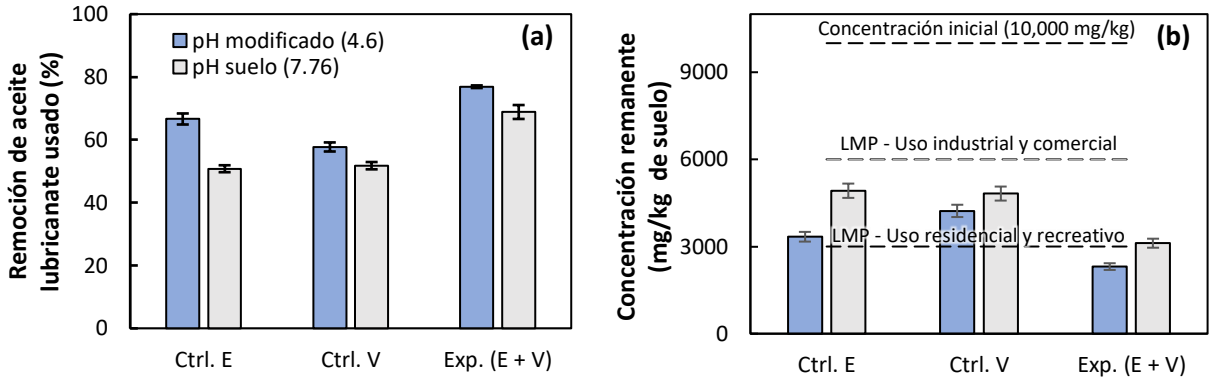


Figura 2. Comparación de la eficiencia de remoción en suelo contaminado con aceite lubricante usado (a) y concentración remanente (b) posterior a 90 días de tratamiento, en función del pH del suelo y estrategias de biorremediación. LMP: Límite máximo permisible.

CONCLUSIONES

Se determina una actividad enzimática máxima de 29.059 ± 1.221 U g^{-1} para el extracto de *Leonotis nepetifolia* a pH 4.6 y temperatura ambiente. En ensayos de hidrólisis alcanza un 42.039 ± 0.5% en 3 h 30 min, mientras que en los ensayos de biorremediación de suelos contaminados logra una remoción del 76.902 ± 0.416% en 90 días, cuando se combina con vermicompost. Este estudio resalta la doble relevancia ambiental de *Leonotis nepetifolia*: por un lado, su aprovechamiento como especie exótica invasora y, por otro, su potencial como fuente enzimática para la remediación sostenible de suelos contaminados con aceite lubricante usado.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilera, F. M. M., Sánchez, C. M. A., Ávila, V. V., Correa, A. H. C. & García, T. J. (2022). Evaluation of the lipase from castor bean (*Ricinus Communis L.*) as a potential agent for the remediation of used lubricating oil contaminated soils. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, *20*(2), 657-673.

Avelar, M. H., Cassimiro, D. M., Santos, K. C., Domingues, R. C., de Castro, H. F. & Mendes, A. A. (2013). Hydrolysis of vegetable oils catalyzed by lipase extract powder from dormant castor bean seeds. *Industrial Crops and Products*, *44*, 452-458. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.10.011.

Bisswanger, H. (2019). Enzyme assays. *Perspectives in Science: Reporting Enzymology, 1*(1), 41–55.

Marrero, D. D., Luisa, C., Rico, M. & González, V. L. (2015). Ácidos grasos constituyentes del aceite de las semillas de *Leonotis nepetifolia* L. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, *46*, 34-37.

Salimnezhad, A., Soltani, J.H. & Soorki, A.A. (2021). Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,* 13(3):653-670.

Santos, K. C., Cassimiro, D. M., Avelar, M. H., Hirata, D. B., de Castro, H. F., Lafuente, R. & Mendes, A. A. (2013). Characterization of the catalytic properties of lipases from plant seeds for the production of concentrated fatty acids from different vegetable oils. *Industrial crops and products,* 49, 462-470.

Tavares, F., Petry, J., Sackser, P. R., Borba, C. E. & Silva, E. A. (2018). Use of castor bean seeds as a lipase source for hydrolysis of crambe oil. *Industrial Crops and Products,* 124, 254-264.

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE UN SUELO HIDROFÓBICO EN IXTAPALUCA, ESTADO DE MÉXICO

Cruz Amparo Hernández Bardomiano[1]; Yoana Hedyt Domínguez León[1]; Estephany Guadalupe Rodríguez Reyes[1]; Edith Montes Hernández[1]

[1] Tecnológico Nacional de México. Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca. Km. 7, Carretera Ixtapaluca-Coatepec, C.P. 56580, Ixtapaluca, Estado de México.

Correo del autor de correspondencia: edith.mh@ixtapaluca.tecnm.mx

RESUMEN

Un suelo hidrofóbico es aquel que repele el agua, dificultando su absorción y penetración. Esta propiedad se debe a la presencia de sustancias orgánicas, como ceras y aceites, que recubren las partículas del suelo, creando una barrera que impide el contacto con el agua. En el presente trabajo se determinaron las propiedades físicas y químicas del suelo a través de la NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Los parámetros fisicoquímicos demostraron que el suelo hidrofóbico se clasifica como un suelo limoso arenoso debido a esta característica, la humedad gravimétrica fue baja (22%), demostrando así que presenta un pH de 5.85, indicando que el pH del suelo hidrofóbico es ácido. Para el caso de la materia y carbono orgánico fueron altos (11.59 y 7.5%). Estas condiciones coinciden con lo reportado para otros suelos hidrofóbicos.

PALABRAS CLAVE: *Hidrofóbico; fertilidad; propiedades del suelo.*

INTRODUCCIÓN

La repelencia del suelo al agua se debe a impregnaciones de compuestos orgánicos que recubren parcialmente las paredes de los poros en los primeros centímetros de suelo. De acuerdo a Dekker (1998) existen mecanismos bien definidos que inducen la repelencia en el suelo y son clasificados de la siguiente manera, por un lado, se encuentra la impregnación de los granos del suelo por secreciones de las plantas o por otros organismos, muchas plantas están asociadas al desarrollo de repelencia en los suelos vecinos, incluso se ha observado repelencia atribuida a hongos asociados a sistemas de cultivo reducido (Chang, 1992), por la presencia de hifas, y por otro lado, por procesos de desecación irreversible. Se ha observado en el caso de turbas (Savage, 1974) por un cambio en el sistema poroso, de forma similar al mecanismo de Emerson (1993). Dekker *et al*. (1999) observaron que la temperatura a la que se seca el suelo influye en la inducción de repelencia. El fuego es una de las causas de inducción de repelencia de mayor importancia desde la perspectiva hidrológica.

Se ha reportado que la repelencia al agua o hidrofobicidad de los suelos está determinada por la interacción entre el contenido de materia orgánica y la textura del suelo (propiedades físicas). En general, la repelencia incrementa con aumentos de la materia orgánica y disminuye con aumentos en los contenidos de arcilla y limo de los suelos (Harper *et al*., 2000). Así como existe una relación directa de la hidrofobicidad con

la materia orgánica y la textura, hay una relación aún más compleja entre la textura del suelo y los tipos de componentes orgánicos de éste (propiedades químicas) (Capriel *et al*., 1995). Si la presencia de materia orgánica en el perfil de suelo es necesaria para la repelencia del agua, existe una relación positiva entre el carbono orgánico y la repelencia al agua (McKissock *et al*., 2003). A medida que aumenta la intensidad en el laboreo del suelo, el ángulo de contacto disminuye y con ello aumenta la capacidad de humectación.

Con base en lo mencionado anteriormente, el objetivo del presente trabajo fue determinar las propiedades físicas y químicas que presenta un suelo hidrofóbico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El muestreo se realizó en el predio ubicado en "El Patronato" San Buenaventura, Ixtapaluca, Estado de México, con coordenadas 19°18'39.6"N 98°52'03.6"W. Este trabajo se desarrolló siguiendo los lineamientos establecidos en la NOM-021- RECNAT-2000; la cual establece las especificaciones técnicas para realizar el muestreo de suelos y obtener información representativa y precisa sobre sus características físicas, químicas y biológicas.

Determinación de parámetros físicos. 1) La textura del suelo se realizó por la prueba de tarro: se colocaron 200 g de muestra de suelo en frascos a los cuales se les añadieron 10 ml de jabón de lavavajillas, completando el volumen restante del frasco con agua de grifo hasta dejar un centímetro desde el borde superior. Los frascos fueron tapados y agitados vigorosamente para asegurar la uniformidad de la mezcla. Posteriormente, se colocaron sobre una superficie plana y se dejaron reposar. Durante el primer minuto, se observó la formación de una capa gruesa en el fondo del frasco, la cual fue identificada y registrada como arena. Tras dos horas adicionales de reposo, se identificó y registró la capa superior de esta sedimentación, denominada limo.

Después de 48 horas de reposo total, se identificó y registró la capa superior de la sedimentación final, clasificada como arcilla. Se procedió a medir con una regla la altura de cada capa y la altura total de las tres capas. Para determinar la textura del suelo, se empleó el triángulo de texturas, calculando los porcentajes de cada componente y ubicándolos en el triángulo correspondiente. 2) Contenido de humedad por gravimetría: Se colocaron en horno de secado cápsulas de porcelana y fueron secadas por 8 h a 105 °C. Las cápsulas fueron colocadas en un desecador y se dejaron enfriar durante 30 minutos registrando nuevamente el peso. Una vez que las cápsulas se mantuvieron en peso constante, se les adicionaron 40 g de suelo y se registró el peso total (el peso del suelo más el peso de la cápsula), para introducirla al horno nuevamente a una temperatura de 105 °C durante 24 h. Una vez pasadas las 24 horas, se colocaron nuevamente en el desecador por 60 minutos y nuevamente se volvieron a pesar para obtener la pérdida del contenido de humedad del suelo seco. 3) Permeabilidad del suelo**:** Para la prueba de permeabilidad se ocuparon 20 g de suelo los cuales fueron colocados en un embudo con papel filtro y sobre una probeta y se le adicionaron de manera lenta 50 ml de agua destilada. Se midió el volumen de agua que logró ser filtrada.

Parámetros químicos. 1) pH: Se añadieron 10 g de suelo previamente tamizado y seco en 20 ml de agua destilada, agitando de manera constante durante 30 minutos.

Posteriormente, se dejó reposar durante 15 minutos. Usando el potenciómetro modelo OAKTON 510 calibrado a tres puntos, se agitó nuevamente la mezcla y se introdujo el electrodo. 2) Contenido de Materia Orgánica: método de Walkley y Black. Se pesaron 0.5 g de suelo tamizado y seco, se colocó en un matraz Erlenmeyer de 500 ml y se adicionaron 10 ml de dicromato de potasio a 1N, girando el matraz para combinarlo con el suelo. Inmediatamente después se adicionaron 20 ml de ácido sulfúrico concentrado a la suspensión para que entrara en contacto con el suelo, se dejó reposar durante 30 minutos sobre una lámina de asbesto, y se aforó a 200 ml con agua destilada. Posteriormente se añadieron 5 ml de ácido fosfórico y 10 gotas de difenilamina, finalmente, se adicionó la disolución de sulfato ferroso gota a gota hasta que el vire a verde claro mediante titulación. Para conocer el porcentaje de materia orgánica se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% C \left(\frac{B-T}{G}\right)(N)(0.39)mcf$$

Donde:
B= Volumen de sulfato ferroso gastado del blanco (ml)
T= Volumen de sulfato ferroso gastado de la muestra (ml)
N= Normalidad exacta del sulfato ferroso
G= Peso del suelo de la muestra empleada
mcf= Factor de corrección por humedad

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de textura para el suelo hidrofóbico presentaron altos contenidos de arenas (57.4%), seguido de limos (24.6%) y arcillas (18%) clasificándose como un suelo limoso arenoso destacando que, en porcentajes, lo que se encuentra a una mayor cantidad son arenas. Según Pineda (2024), estos suelos presentan características de ser ácidos, cálidos, pobres en nutrientes, no retienen el agua, son secos y no son aptos para la agricultura (Cuadro 1).

Con respecto al contenido de humedad gravimétrica, el suelo hidrofóbico presentó un resultado de 3.2% (cuadro 1), este porcentaje de humedad gravimétrica determinado en el suelo con características arenosas indica que el área delimitada retiene cantidades mínimas de agua. La textura arenosa del suelo no favorece la absorción y penetración del agua. Según Traxco (2023b), el rango óptimo de humedad disponible para suelos arenosos es del 7%, por lo que el suelo analizado se encuentra 3.25% por debajo de este rango óptimo. Esta deficiencia puede ocasionar problemas relacionados con el contenido de materia orgánica, la estructura y la textura del suelo.

En cuanto a la permeabilidad del suelo hidrofóbico fue del 22%, en suelos ideales, la porosidad es del 50%, distribuyéndose en 33% para los poros grandes (0.01-0.05 mm) y el 66% restante para los poros medianos (0.0002- 0.01 mm). Los poros pequeños (< 0.0002 mm) retienen agua que no está disponible para las raíces de las plantas. Para un desarrollo adecuado de las plantas, la porosidad mínima debe ser del 35% en suelos francos y del 45% en suelos arcillosos.

Con base en estos datos, el suelo hidrofóbico presentó bajos niveles de permeabilidad, con retenciones de agua del 22%, evidenciando una limitada capacidad de absorción de agua (Cuadro 1).

Con respecto a los parámetros químicos, los resultados obtenidos con respecto al pH fueron de 5.85, indicando que el pH del suelo hidrofóbico es ácido; este rango de pH afecta la disponibilidad de nutrientes para las plantas, y puede causar deficiencias, toxicidades o desbalances en los niveles de nutrientes (Benton, 2003). De acuerdo con Prasad y Power (1997), el pH óptimo para suelos agrícolas debe estar entre 6.5 y 7.0 para lograr el mejor rendimiento y productividad. De acuerdo con estos resultados, en términos generales, los suelos de la zona el Patronato en San Buenaventura, Ixtapaluca, Estado de México, son predominantemente ácidos (Cuadro 1).

Los datos obtenidos de materia orgánica fueron de 11.59%, mientras que para carbono orgánico fue de 7.5% respectivamente (Cuadro 1), de acuerdo con lo establecido en la NOM-021-RECNAT-2000, el área analizada presenta un alto contenido de materia orgánica. El porcentaje de carbono orgánico en los suelos varía ampliamente, pero generalmente se encuentra entre 0.5% y 3.0% en horizonte A la mayoría de los suelos de tierras altas. Los suelos con menos del 0.5% de carbono orgánico se encuentran principalmente en zonas desérticas, mientras que los suelos orgánicos, como los histosoles, pueden tener más de 12% a 18% de carbono orgánico.

Cuadro 1. Resultados de los parámetros físicos y químicos del suelo hidrofóbico.

Nombre de la prueba	Resultado
Textura	Arenas 57.4% Limos 24.6% Arcillas 18%
Humedad gravimétrica	3.27%
Permeabilidad	13.2%
pH	5.85
Materia orgánica	11.59%
Carbón orgánico	7.5%

CONCLUSIONES

Los parámetros físicos y químicos demostraron que el suelo hidrofóbico se clasifica como un suelo limoso arenoso debido a esta característica, la humedad gravimétrica fue baja (22%), demostrando así que presenta un pH de 5.85, indicando que el pH del suelo hidrofóbico es ácido. Para el caso de la materia y el carbono orgánico fueron altos (11.59 y 7.5%). Estas condiciones coinciden con lo reportado para otros suelos hidrofóbicos.

AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico de Estudios Superiores de la Ixtapaluca por el apoyo en insumos e instalaciones para la realización de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

Dekker, L.W. (1998). Moisture variability resulting from water repellency in Dutch soils. Tesis Doctoral.

Dekker, L.W., Ritsem, C.J., Oostindie, K. & Boersma, O.H. (1998). Effect of drying temperature on the severity of soil water repellency. *Soil Sci.,* 163:780-796.

SAVAGE, S.M. (1974). Mechanism of fire-induced water repellency in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 38:652-657.

Capriel, P. (1997), Hydrophobicity of organic matter in arable soils: influence of management. *Eur. J. Soil Sci.,* 48:457-462.

Chang, K.Y. (1992). Development of seasonal water repellency under direct drilling. *Soil Sci. Soc. Am. J.,* 56:326-329

Emerson, W.W., (1993). Comments on "Development of seasonal water repellence under direct drilling", *Soil Sci. Soc. Am. J.,* 57:877.

Harper, R.J. y R.J. Gilkes, (1994), Soil attributes related to water repellency and the utility of soil survey for predicting its occurrence. *Aust. J. Soil Res,* 32:1109-1124

Mckissock, I., Gilkes, R.J., Harper, R.J. & Carter, D.J. (1998), Relationships of water repellency to soil properties for different spatial scales of study. *Aust. J. Soil Res,* 36:495-507.

DISTRIBUCIÓN DE SALES SOLUBLES EN LOS SUELOS DEL FONDO LACUSTRE DEL LAGO CRÁTER TECUITLAPA, PUEBLA

Danna Guadalupe Gil González[1]; Héctor Manuel Ortega Escobar[1]; Abdul Khalil Gardezi[1]; Carlos Ramírez Ayala[1]; Adriana Camacho Ballesteros[2]

[1] Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, carretera México-Texcoco km 35.6, Montecillo, Texcoco C.P. 56230, Estado de México, México.
[2] Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios No. 147, Carrillo Flores 100, Enrique Velasco Ibarra, 38664 Acámbaro, Guanajuato, México.

Correo del autor de correspondencia: gil.danna@colpos.mx

RESUMEN

La salinidad del suelo es un factor determinante en la sostenibilidad de los ecosistemas, siendo la conductividad eléctrica del extracto de saturación (CEe) el método estándar para su evaluación. Sin embargo, su aplicación es limitada debido a su complejidad técnica. Por ello, esta investigación comparó la eficacia del método tradicional CEe con el método alternativo suelo-agua 1:5 en suelos del lago cráter Tecuitlapa, Puebla, con el objetivo de establecer su viabilidad como técnica sustituta.

El estudio se realizó en el fondo seco del lago Tecuitlapa, ubicado en la Cuenca Serdán-Oriental, una zona endorreica de clima árido y antecedentes de salinización. Se tomaron muestras de un perfil de 0 a 150 cm, midiendo la CE y el residuo seco evaporado (RSE) en extractos de saturación y en extractos 1:5. Los resultados mostraron que la CEe fue en promedio 4.115 veces mayor que la $CE_{1:5}$, y el RSEe fue 5.785 veces superior al $RSE_{1:5}$. Aun así, se observó una correlación lineal muy alta entre ambos métodos: $R^2 = 0.9986$ para la CE y $R^2 = 0.9887$ para el RSE.

Estos resultados indican que, a pesar de la dilución asociada al método 1:5, existe una relación consistente con el método estándar, lo que permite su uso como estimador confiable de la salinidad en suelos con características similares.

PALABRAS CLAVE: *conductividad; relación; Salinidad; saturación; Tecuitlapa.*

INTRODUCCIÓN

La salinidad del suelo se evalúa comúnmente a través de la conductividad eléctrica del extracto de pasta saturada (CEe), considerada el método estándar por su capacidad de simular las condiciones naturales del suelo y su relación directa con la respuesta del crecimiento vegetal. No obstante, su aplicación presenta limitaciones prácticas: es un procedimiento laborioso, requiere experiencia técnica, y resulta especialmente difícil en suelos arcillosos o cuando se manejan grandes cantidades de muestras durante campañas de monitoreo (Khorsandi y Yazdi, 2007).

Como alternativa, diversos investigadores han propuesto métodos más simples que utilizan relaciones fijas de masa suelo-agua (1:1, 1:2, 1:2.5, 1:5). De acuerdo con Sonmez *et al.* (2008), estas técnicas reducen el tiempo y complejidad del análisis, aunque presentan

desventajas relacionadas con la dilución de iones y la menor representatividad de las condiciones reales del suelo.

Las proporciones 1:1 y 1:5 son las más utilizadas internacionalmente, predominando la 1:5 en países como Australia y China, y la 1:1 en Estados Unidos (Kargas *et al*., 2018).

El objetivo de esta investigación fue comparar ambos métodos a lo largo de un perfil de suelo para evaluar su grado de correspondencia, identificar posibles variaciones por profundidad y establecer la viabilidad del método 1:5 como sustituto práctico del extracto de saturación en las condiciones de los suelos del lago cráter Tecuitlapa. Dicha comparación contribuirá a generar modelos de conversión adaptados a los tipos de suelo específicos de la región, facilitando decisiones más informadas en el manejo de la salinidad y la fertilidad del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La Cuenca Serdán-Oriental se localiza en el centro-este de México, entre los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. Geográficamente, se encuentra aproximadamente entre los 18°55′ y 19°25′ de latitud norte, y los 97°15′ y 97°35′ de longitud oeste Figura 1. Se sitúa a una altitud promedio de 2,300 msnm y forma parte del Eje Volcánico Transmexicano, una de las regiones geológicamente más activas del país (Ort y Carrasco-Núñez, 2009; Silva-Aguilera *et al*., 2022).

Geológicamente, la cuenca es una estructura endorreica. Está rodeada por importantes formaciones volcánicas: al este, Citlaltépetl (Pico de Orizaba) y el Cofre de Perote; al norte, la caldera de Los Humeros; al oeste, una dorsal volcánica del Mioceno; y al sur, afloramientos de rocas sedimentarias mesozoicas (Ort y Carrasco, 2009). Esta configuración geológica y tectónica favorece la acumulación de agua en el interior de la cuenca, originando diversos tipos de cuerpos lacustres.

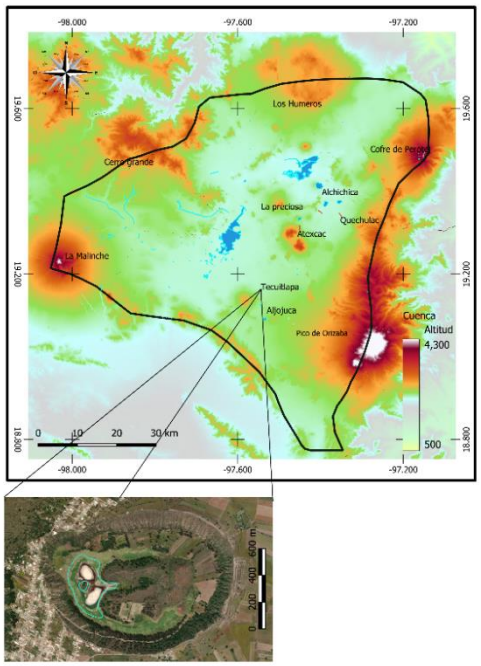


Figura 1. Localización de la cuenca Serdán - Oriental y del ex lago cráter Tecuitlapa, Puebla, México.

La cuenca alberga alrededor de una docena de volcanes tipo maar, formaciones explosivas originadas por la interacción entre magma y agua subterránea. Algunos de estos maars contienen lagos modernos, como Alchichica, Atexcac, Aljojuca, Quechulac, La Preciosa y Tecuitlapa. Localmente, estos lagos se conocen como axalapazcos, palabra náhuatl que significa "recipientes de arena con agua" (Silva-Aguilera *et al*., 2022). La composición de estos lagos varía entre agua dulce y ligeramente salina, dependiendo de su historia hidrogeológica, su grado de evaporación y el aporte de sales desde el subsuelo (Vilaclara *et al*., 1993). Los suelos de la cuenca están formados principalmente por materiales volcánicos, como tobas, depósitos piroclásticos y basaltos, lo que les confiere

alta porosidad y conductividad hidráulica. Estas propiedades, junto con el clima seco, favorecen la infiltración rápida del agua y la recarga de acuíferos, pero también incrementan el riesgo de acumulación de sales en zonas de descarga o baja circulación. (Carrasco-Núñez, 2012; Ort y Carrasco-Núñez, 2009).

El mar de Tecuitlapa se encuentra en el extremo oriental de la Cuenca Serdán-Oriental, tiene forma elíptica, de aproximadamente 1.3 km de largo (E-O) por 1.0 km de ancho (N-S) y una profundidad de alrededor de 100 metros. De acuerdo con Vilaclara *et al*. (1993), y desde el punto de vista hidroquímico, Tecuitlapa presentaba aguas alcalinas, con predominio de sodio y magnesio entre los cationes, y bicarbonatos y cloruros como aniones principales.

La conductividad eléctrica y el RSE de cada muestra se determinaron mediante los métodos descritos por el USDA (1954). Los extractos de pasta saturada se prepararon añadiendo agua destilada a 400 g de muestra de suelo y agitando hasta su saturación completa, se dejaron equilibrar durante 24 h. Se obtuvieron extractos al vacío filtrando la pasta con papel filtro Whatman 42 en botellas de polietileno de 250 ml.

Los extractos agua-suelo 1:5 se prepararon añadiendo 250 ml de agua destilada a 50 g de suelo secado al aire, se dejó equilibrar durante 24 h y se filtraron a través de papel filtro Whatman 42 en botellas de polietileno de 250 ml, las lecturas de CE se tomaron a 25° con un conductímetro Jenway 4510. Para evaluar la posible relación lineal de CEe con $CE_{1:5}$, se utilizaron modelos de regresión lineal simple con $CE_{1:5}$ como variable dependiente (x) y la respuesta de ECe como variable independiente (y). De igual forma para la relación del RSE.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores resumidos de la conductividad eléctrica y el residuo seco evaporado del perfil de suelo se presentan en el Cuadro 1. Las conductividades eléctricas de las muestras de suelo estudiadas variaron de 3.77 a 59.5 mS cm^{-1} para los extractos de pasta saturada, y de 0.54 a 14.65 mS cm^{-1} para la relación suelo-agua (1:5). El RSE varió de 3,270 a 65,725 ppm para los extractos de pasta saturada y de 745 a 11225 ppm para la relación suelo-agua (1:5). La relación 1:5 tiende a subestimar la CEe debido a su mayor volumen de agua como lo sugieren el USDA (1954) y Kargas *et al.* (2018).

La CE media de los extractos de saturación fue casi 4.3 veces mayor que la de los extractos suelo-agua (1:5). Estos resultados difieren de los de Sonmez *et al.* (2008) y Aboukila y Norton (2017), quienes informaron que la CE media fue aproximadamente 8 y 5.7 veces mayor que la de los extractos 1:5, respectivamente.

De acuerdo con la Figura 2, los resultados mostraron una fuerte correlación lineal entre la CEe y la $CE_{1:5}$ ($R^2 = 0.9986$), lo que indica que ambos métodos pueden utilizarse como herramientas confiables para estimar la salinidad de los suelos con características como Tecuitlapa.

Cuadro 1. Comparación de la CE y el RSE con los dos métodos en el perfil del suelo-

Profundidad (m)	$CE_{1:5}$ (mS/cm)	CEe (mS cm^{-1})	$RSE_{1:5}$ (ppm)	RSEe (ppm)
Costra	14.65	59.50	11225	65725
0-10	6.12	25.36	4025	21955
10 - 20	2.99	12.79	1895	10440
20 - 30	2.78	11.01	1755	9150
30 -40	2.58	11.51	1640	10070
40 - 50	3.46	15.78	2240	18250
50 - 60	3.31	13.92	2150	12770
60 - 70	2.38	9.89	1580	8820
70 - 80	1.59	6.94	1950	5790
80 - 90	1.44	6.26	900	5315
90 - 100	1.25	5.27	785	4520
100 - 110	1.29	5.31	850	4680
110 - 120	1.20	4.51	820	3910
120 - 130	1.11	4.32	810	3770
130 - 140	0.90	3.52	720	3240
140 -150	0.54	3.77	745	3270

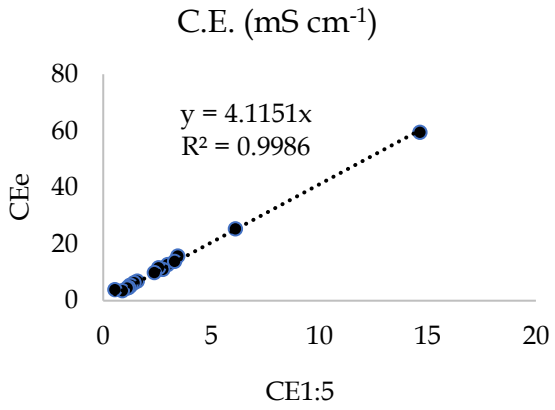


Figura 2. Relación entre la CEe y la $CE_{1:5}$

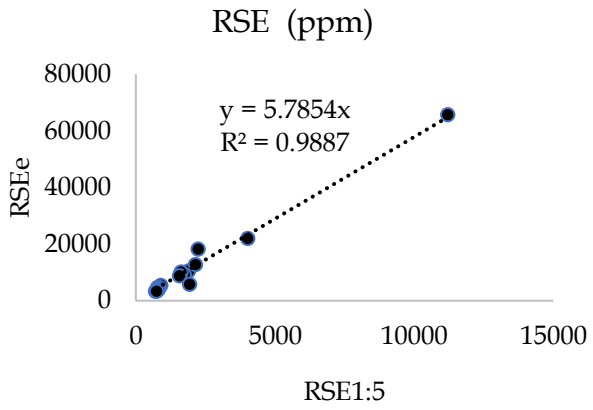


Figura 3. Relación entre el RSEe y el $RSE_{1:5}$

De igual forma, con respecto al RSEe y $RSE_{1:5}$ (Figura 3subíndice (Figura 3), se observa una alta correlación lineal (R^2 = 0.9887), rectificando la confiabilidaden la estimación de la salinidad. El RSEe fue 5.3 veces mayor que el de los extractos suelo:agua (1:5), coincidiendo con los datos para conductividad eléctrica.

En las investigaciones de Ismayilov *et al.* (2021), donde analiza la relación entre la conductividad eléctrica (EC) y el contenido de sales solubles totales (TSS) en extractos de suelo-agua con una proporción 1:5, se concluye que la conductividad eléctrica está influida no solo por la concentración de sales, sino también por el tipo de iones presentes y su movilidad en solución, lo cual indica que es fundamental adaptar los modelos a la química local del suelo.

CONCLUSIONES

La presente investigación demostró que el método suelo-agua 1:5 presenta una alta correlación con el método estándar del extracto de saturación, tanto en la conductividad eléctrica como en el residuo seco evaporado. Aunque las concentraciones absolutas de sales fueron menores en el método 1:5 debido a la dilución, los resultados revelaron una fuerte relación lineal entre ambos procedimientos. Esto permite considerar al método 1:5 como una alternativa válida y más accesible para estimar la salinidad de los suelos, considerando su composición iónica y características particulares. Su aplicación podría facilitar el monitoreo a gran escala y la toma de decisiones en el manejo de suelos salinos en regiones con características similares.

BIBLIOGRAFÍA

Aboukila, E. F., & Norton, J. B. (2017). Estimation of saturated soil paste salinity from soil-water extracts. *Soil Science,* 182(3), 107-113. 10.1097/SS.0000000000000197.

Carrasco-Núñez, G. (2012). *Rhyolitic and basaltic maar volcanoes, a perspective from Mexican volcanism*. Geoscience Society of New Zealand Miscellaneous Publication 131A, 21. Consultado el 30 de junio de 2025 en https://www.researchgate.net/profile/Szabolcs-Kosik/publication/236173457.

Ismayilov, A. I., Mamedov, A. I., Fujimaki, H., Tsunekawa, A., & Levy, G. J. (2021). Soil salinity type effects on the relationship between the electrical conductivity and salt content for 1: 5 soil-to-water extract. *Sustainability,* 13(6), 3395. https://doi.org/10.3390/su13063395.

Kargas, G., Chatzigiakoumis, I., Kollias, A., Spiliotis, D., Massas, I., & Kerkides, P. (2018). Soil salinity assessment using saturated paste and mass soil: water 1: 1 and 1: 5 ratios extracts. *Water,* 10(11), 1589. 10.3390/w10111589.

Khorsandi, F., & Yazdi, F. A. (2007). Gypsum and texture effects on the estimation of saturated paste electrical conductivity by two extraction methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis,* 38(7-8), 1105-1117. http://dx.doi.org/10.1080/00103620701278120.

Ort, Michael & Carrasco-Núñez, Gerardo. (2009). Lateral vent migration during phreatomagmatic and magmatic eruptions at Tecuitlapa Maar, east-central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.01.003.

Silva-Aguilera, R. A., Vilaclara, G., Armienta, M. A., & Escolero, Ó. (2022). Hydrogeology and hydrochemistry of the Serdán-Oriental Basin and the Lake Alchichica. In Lake Alchichica Limnology: The Uniqueness of a Tropical Maar Lake (pp. 63-74). Cham: Springer International Publishing. 10.1007/978-3-030-79096-7_5.

Sonmez, S., Buyuktas, D., Okturen, F., & Citak, S. (2008). Assessment of different soil to water ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in soil salinity studies. *Geoderma,* 144(1-2), 361-369. 10.1016/j.geoderma.2007.12.005.

USDA. 1954. Diagnoses and improvement of saline and alkali soils. Agric. Handbook No. 60. USSL, Riverside, CA.

Vilaclara, G., Chávez, M., Lugo, A., González, H., & Gaytán, M. (1993). Comparative description of crater-lakes basic chemistry in Puebla State, Mexico. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen,* 25(1), 435-440. https://doi.org/10.1080/03680770.1992.11900158.

EFECTO DE QUEMAS PRESCRITAS SOBRE LA RESPIRACIÓN POTENCIAL DEL SUELO EN LA RESERVA ECOLÓGICA DE MADERAS DEL CARMEN

Alexa Gil Arana[1]; Karla Liliana López García[2]; Dulce Flores Rentería[3]

[1] Instituto Politécnico Nacional. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Zacatenco, Av. Wilfrido Massieu 399, Col. Nueva Industrial Vallejo, C.P. 07738, Alcaldía Gustavo A. Madero, CDMX, México.
[2] Doctorado en Ciencias en Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía. Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV), Unidad Saltillo. Av. Industria Metalúrgica 1062, Parque Industrial Ramos Arizpe, C.P. 25900, Coahuila, México.
[3] SECIHTI- CINVESTAV, Unidad Saltillo.

Correo del autor de correspondencia: yaahid.flores@cinvestav.edu.mx

RESUMEN

La respiración del suelo es entendida como el proceso de liberación de CO_2 por unidad de área y tiempo resultante de varios procesos, incluida la respiración por raíces vivas, la actividad de los organismos heterótrofos del suelo y la oxidación química de los detritos de las plantas. Esta variable es influenciada por prácticas de manejo del suelo, factores climáticos, además de las características biológicas, físicas y químicas del suelo. La respiración del suelo está estrechamente relacionada con la actividad microbiana, por lo cual es un indicador para determinar el estado de salud del suelo. En el presente estudio se evaluó el efecto de las quemas prescritas en la respiración del suelo en el Área de Protección de Flora y Fauna Maderas del Carmen, para identificar su influencia sobre la actividad biológica. Se determinó la tasa de respiración inducida por sustrato acumulada diariamente durante 21 días con el equipo EGM-5. Se presentó la respiración acumulada en este periodo. Los suelos que exhibieron una mayor respiración fueron los sitios con quemas prescritas más recientes del año 2022 (7.26 ± 0.19 g C m^{-2}) y del 2021 (6.96 ± 0.37 g C m^{-2}), en comparación con el sitio con quema más antigua del año 2013 (5.68 ± 0.28 g C m^{-2}) y del sitio sin ningún registro de evento de fuego (3.91 ± 0.41 g C m^{-2}). La aplicación de las quemas prescritas resultó en un aumento de la respiración del suelo a causa de las condiciones favorecedoras postquema para los microorganismos debido al incremento de sustrato disponible generado por las cenizas.

PALABRAS CLAVE: *Actividad microbiana; flujo de carbono; materia orgánica.*

INTRODUCCIÓN

El Área de Protección de Flora y Fauna Maderas del Carmen, ubicada al norte de Coahuila, es una región de alto valor ecológico ya que alberga ecosistemas representativos del desierto coahuilense, donde habitan especies en peligro de extinción tanto de flora como de fauna (CONANP, 2025). En los últimos años, las quemas prescritas se han implementado como herramienta de manejo forestal de conservación con el objetivo de modificar la estructura de la vegetación de matorral desértico para propiciar

condiciones idóneas y recuperar el hábitat de diversas especies como son bisonte americano (*Bison bison*), borrego cimarrón (*Ovis canadensis*), venado bura (*Odocoileus hemionus*) y berrendo (*Antilocapra americana*) (CAAP, 2022).

No obstante, estas prácticas pueden generar cambios importantes en las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo, afectando su funcionalidad ecológica. Uno de los indicadores fundamentales para evaluar la influencia de estas prácticas es la respiración del suelo (R_S), ya que esta variable microbiológica puede brindar información sobre las alteraciones causadas por el estrés ambiental y las actividades antropogénicas; por lo cual es un indicador para determinar el estado de salud del suelo (Guerrero-Ortiz *et al.,* 2012). Bajo este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de las quemas prescritas a la respiración del suelo en la Reserva de Maderas del Carmen, con la finalidad de comprender su influencia sobre la actividad biológica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron cuatro sitios ubicados en el Área de Protección de Flora y Fauna Maderas del Carmen, localizada en los municipios de Múzquiz, Acuña y Ocampo, del estado de Coahuila. Para el análisis, se recolectaron muestras de suelo en octubre del año 2024 en tres sitios con antecedentes con eventos de fuego ocurridos en los años 2013 (incendio), 2021 y 2022 (quemas prescritas), así como en un sitio adicional sin registro de eventos de fuego.

Las muestras fueron trasladadas al Laboratorio de Sustentabilidad del Suelo del CINVESTAV, unidad Saltillo, donde se tamizaron utilizando una malla de 2 mm de diámetro. Posteriormente, en contenedores de policloruro de vinilo (PVC) de 2,54 cm de diámetro y 8 cm de altura (4”), se adicionaron 100 g de suelo por muestra. Para cada sitio, se prepararon cuatro réplicas experimentales a las cuales se les adicionó 1 g de glucosa con el objetivo de inducir la respiración, además de una réplica control sin adición de glucosa. En total se realizaron 20 réplicas experimentales. Los contenedores fueron incubados en una cámara de crecimiento a 30 °C y 80% de humedad relativa durante 21 días.

Previo a la medición de la respiración del suelo (R_S), los contenedores fueron hidratados con agua destilada ajustando el volumen en función de su capacidad de retención de agua, la cual fue calculada mediante la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez. En el caso del suelo sin antecedentes de quema, se añadieron 17 ml; para el suelo con quema en 2021 se utilizaron 14.5 ml; mientras que los suelos de las áreas quemadas en 2013 y 2022 se humedecieron con 11.5 ml. Transcurrida una hora, se determinó la respiración del suelo mediante una cámara de respiración SRC-2 acoplada al equipo EGM-5, el cual cuenta con un sensor infrarrojo no dispersivo. El monitoreo de la respiración se realizó diariamente a las 11:00 h durante un periodo continuo de 21 días, por lo cual, se colocó la cámara de respiración directamente sobre cada contenedor durante un periodo de 60 segundos para la medición.

Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía ($p < 0.05$) y se aplicó una prueba post-hoc de Tukey HSD con el propósito de identificar diferencias significativas entre los sitios evaluados. Se utilizó el software

Statistica v10.0. La elaboración de los gráficos se llevó a cabo empleando el software RStudio versión 1.3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observa un incremento progresivo en la R_S conforme se avanza en la secuencia de las quemas. Para el caso de los controles (sin adición de glucosa), presenta los valores más bajos de RS (2.05 ± 0.65 g C m-2), seguidos del suelo sin antecedentes de un evento de fuego (3.91 ± 0.41 g C m-2). A partir de las quemas para los años 2013 (5.68 ± 0.28 g C m^{-2}), 2021 (6.96 ± 0.37 g C m^{-2}) y 2022, los valores aumentan notablemente, alcanzando su punto máximo en el tratamiento más reciente correspondiente a la quema del año 2022 (7.26 ± 0.19 g C m^{-2}); sin embargo, este último no mostró diferencias significativas con la quema prescrita del 2021 (Figura 1).

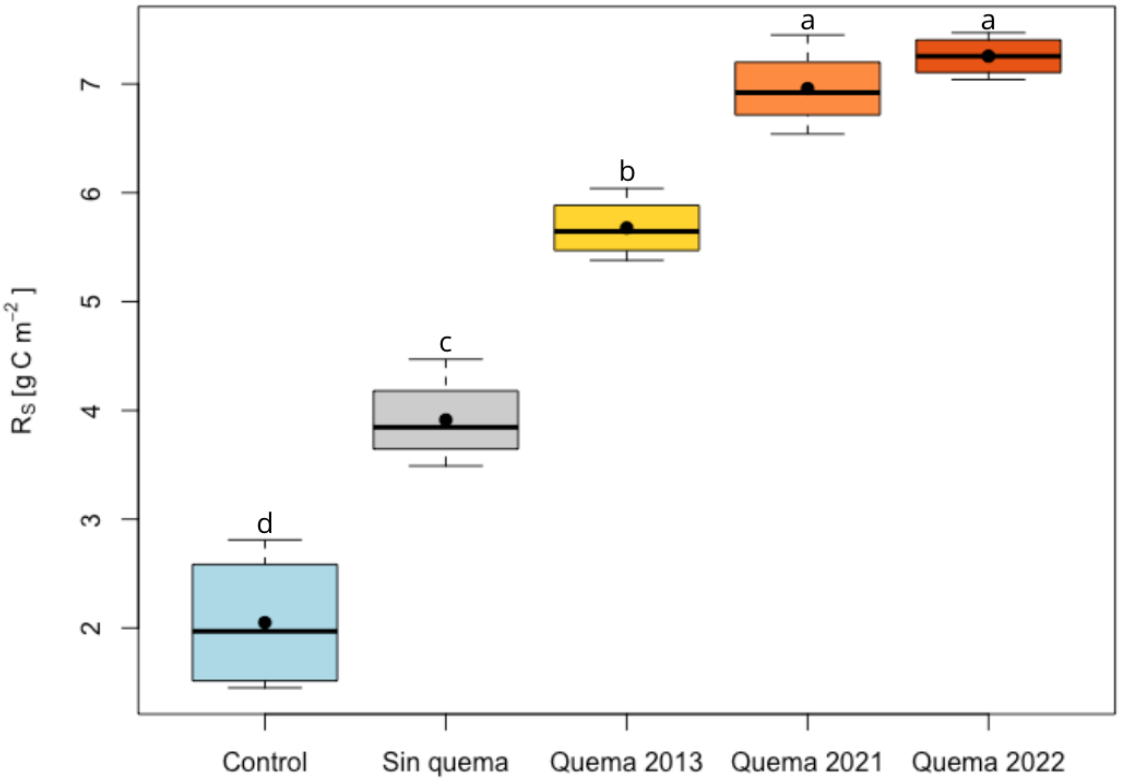


Figura 1. Tasa de respiración de suelo acumulada durante 21 días para las diferentes quemas practicadas.

Las letras minúsculas representan las diferencias significativas de acuerdo con una prueba post-hoc Tukey HSD (P<0.05); el punto central representa la media y la línea representa la mediana.

El aumento en la tasa de respiración del suelo posterior a la aplicación de las quemas prescritas se debe a que los microorganismos sobrevivientes se ven favorecidos a causa de las condiciones postquema, principalmente el incremento de la cantidad de sustrato disponible, y crecen rápidamente al aprovechar los nutrientes contenidos en las cenizas (Pérez-Pimentel, 2022).

En el caso particular de las quemas controladas, la temperatura del suelo se ve atenuada por las propiedades aislantes del suelo como lo es su profundidad, y, por lo tanto, se espera que la muerte masiva de microorganismos y la combustión de materia orgánica se limite en los horizontes superiores del suelo (Johnson *et al.,* 2024). La ceniza generada a causa de la quema prescrita es rica en carbono orgánico (CO) y nutrientes solubles fácilmente degradables, capaces de estimular el crecimiento de las poblaciones microbianas. Después de la quema se movilizan los nutrientes totales, tanto del suelo como de las cenizas, logrando la reactivación de la actividad microbiana y promoviendo la liberación de CO_2 almacenado en los poros del suelo. Propiciando un corto, pero intenso, periodo de mineralización, explicando el alto flujo de CO_2 (Pérez-Pimentel, 2022).

En contextos específicos, como en ecosistemas semiáridos o pastizales, se ha observado que las quemas prescritas favorecen la regeneración de la vegetación y mejorar la dinámica del ciclo del carbono mediante la estimulación de la actividad microbiana, lo cual repercute en un aumento moderado de la actividad microbiana, que se refleja en un aumento de la respiración del suelo, a mediano plazo (Fontúrbel *et al.,* 2021).

CONCLUSIONES

Las quemas prescritas que se han realizado en el Área de Protección de Flora y Fauna de Maderas del Carmen resultan en un aumento de la respiración del suelo. Este efecto se intensificó a medida que los eventos de quema son más recientes, siendo más evidente en los tratamientos correspondientes a 2021 y 2022 a causa de las condiciones favorecedoras postquema para los microorganismos.

BIBLIOGRAFÍA

CAAP. (2022). Quemas prescritas en el APFF Maderas del Carmen. Boletín CAAP.

CONANP. (2013). Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Maderas del Carmen. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

Fontúrbel, T., Carrera, N., Vega, J. A. & Fernández, C. (2021). The Effect of Repeated Prescribed Burning on Soil Properties: A Review. *Forests*, *12*(6), 767. https://doi.org/10.3390/f12060767.

Guerrero-Ortiz, P. L., Quintero-Lizaola, R., Espinoza-Hernández, V., Benedicto-Valdés, G. S., & Sánchez-Colín, M. de J. (2012). Respiración de CO_2 como indicador de la actividad microbiana en abonos orgánicos de Lupinus. *Terra Latinoamericana, 30*(4), 355–362.

Johnson, D. B., Yedinak, K. M., Sulman, B. N., Berry, T. D., Kruger, K., & Whitman, T. (2024). Effects of fire and fire-induced changes in soil properties on post-burn soil respiration. *Fire Ecology*, *20*(1), 90. https://doi.org/10.1186/s42408-024-00328-1.

Pérez-Pimentel, Y. (2022). Efectos de la ceniza procedente de los incendios forestales y/o quemas prescritas sobre las propiedades de los suelos [Tesis de licenciatura, Universidad de La Laguna]. https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/30352.

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN SUELOS AGRÍCOLAS IRRIGADOS POR AGUAS PROVENIENTES DEL ALTO BALSAS, MÉXICO

Jonathan Torres Rosique[1]; José Víctor Tamaríz Flores[2]; Numa Pompilio Castro González[3]; Rosalía Castelán Vega[2]

[1] Posgrado en Ciencias Ambientales, Instituto de Ciencias. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Puebla, México.
[2] Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas, Instituto de Ciencias. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, Puebla, México.
[3] Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Tlatlauquitepec, Puebla, México.
Correo del autor de correspondencia: jonathan.torresrosique@viep.com.mx

RESUMEN

En la zona metropolitana de Puebla y Tlaxcala la descarga de residuos hacia la subcuenca del Alto Balsas constituye una problemática ambiental, que se ha incrementado en los últimos años, generando riesgos a la salud derivados de la utilización de agua contaminada para riego. Los suelos agrícolas se convierten en receptores de contaminantes, incluidos los metales pesados, quedando retenidos por las arcillas, alcanzando niveles tóxicos para los cultivos, por lo que el objetivo de este estudio fue evaluar el grado de contaminación por metales pesados en suelos agrícolas. El estudio se llevó a cabo en tres zonas representativas de la subcuenca, obteniendo muestras de suelos para determinar la concentración de metales pesados y propiedades químicas, además, para evaluar su grado de contaminación se obtuvieron el índice de geoacumulación (*Igeo*) y el factor de enriquecimiento (FE). Los resultados muestran que los valores de metales pesados superan los límites máximos para suelos agrícolas. El *Igeo* mostró una contaminación de fuerte a moderada para las concentraciones de Cd, Co y Zn, en tanto que la contaminación por Cr, Cu y Ni fue moderada. El FE presentó un enriquecimiento significativo para los elementos como Cd, Co, Cr, Cu y Zn, demostrando que la contaminación de suelos agrícolas está relacionada con fuentes antropogénicas. Esta información contribuye a acciones de prevención, control, manejo y remediación sobre concentraciones de metales pesados en manejo de cuencas.

PALABRAS CLAVE: *contaminación de suelos; factor de enriquecimiento; índice de geoacumulación.*

INTRODUCCIÓN

En la zona metropolitana de Puebla y Tlaxcala, la descarga de residuos de origen doméstico y público hacia la subcuenca del Alto Balsas constituye una problemática ambiental debido a la ampliación de grandes asentamientos urbanos (López y Montalvo, 2015). Además, los desechos industriales de tipo textil, químicos y metalúrgicos generan contaminación de metales pesados y otras sustancias químicas tóxicas a través del

afluente (Cortés-Hernández, 2021). Estudios realizados en la subcuenca han identificado posibles riesgos de cáncer, malformaciones congénitas y fallos renales derivados del consumo y utilización de agua para riego (Mora *et al*., 2021; Handal-Silva *et al*., 2017).

Debido al alto crecimiento urbano y a la expansión de zonas industriales en la subcuenca del Alto Balsas, los objetivos de la presente investigación fueron evaluar el grado de contaminación por metales pesados en los suelos agrícolas mediante un análisis de propiedades químicas y factores de contaminación. Los resultados permitirán establecer patrones de la contaminación para implementar políticas públicas sobre el manejo de descargas domésticas e industriales, además de apoyar la gestión de uso de suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en la subcuenca del Alto Balsas, que se localiza parcialmente en el área metropolitana de los estados de Puebla y Tlaxcala. El área de estudio se dividió en tres zonas tomando como criterio los sitios de bajo (I), mediano (II) y alto (III) impacto por contaminantes antropogénicos como desechos domésticos, agrícolas e industriales (Figura 1).

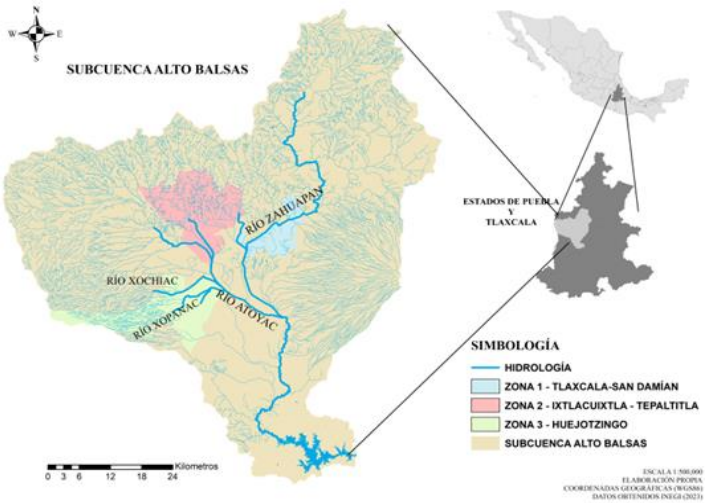


Figura 1. Mapa subcuenca del Alto Balsas y zonas representativas del área de estudio.

Se realizaron 48 muestras compuestas de suelo, a una profundidad de 30 cm, para representar 16 parcelas destinadas a la producción agrícola irrigadas con afluentes de la subcuenca del Alto Balsas. Se realizaron los análisis de suelos basados en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002). Las digestiones de las muestras de suelo se realizaron siguiendo el método establecido por US EPA, Method-3051A digestión para sedimentos, suelos, lodos y aceites (US EPA, 2007).

Se evaluaron las concentraciones de los siguientes elementos: Ba, Cr, Ni, Cu, Cd, Pb, Co, Zn y V. El análisis se llevó a cabo mediante espectrometría de emisión óptica de acoplamiento inductivo (ICP-OES) siguiendo procedimientos de la norma oficial mexicana NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004 (NOM 147-SEMARNAT/SSA1-2004, 2007) y la metodología 6010D de la USEPA (2018).

El grado de contaminación se calculó a través de los índices de geoacumulación (*Igeo*) y el factor de enriquecimiento (FE). El *Igeo* propuesto por Muller (1969) permite determinar el grado de contaminación del suelo por metales pesados, comparando las

concentraciones actuales con los niveles preindustriales, se calcula con la siguiente ecuación:

$$Igeo = \log_2\left(\frac{Cn}{1.5Bn}\right)$$

Donde *Cn* es la concentración de los elementos obtenidos en la muestra; *Bn* es el valor de fondo o de referencia; 1.5 es una constante diseñada para las fluctuaciones.

El FE permite identificar si las concentraciones de los metales provienen de actividades antropogénicas u origen natural, se calcula utilizando la siguiente fórmula utilizada por diversos autores (Barbieri, 2016; Sappa *et al.*, 2020):

$$FE = \frac{Cn/_{Cn\,ref}}{Bn/_{Bn\,ref}}$$

Cn es la concentración del metal en la muestra del suelo; *Bn* es la concentración del elemento de referencia en el suelo; REF es el valor del metal adoptado como "Referencia", aquel elemento cuyo contenido en las muestras proviene de la corteza terrestre (Aytop *et al*., 2023). Los resultados se evaluaron utilizando el paquete Statgraphics v28.0, donde fueron sometidos a un ANOVA mediante la prueba paramétrica de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se observan las concentraciones promedio de metales pesados en suelos agrícolas irrigados por agua provenientes del Alto Balsas. De acuerdo con la norma regulatoria de la US EPA, en todas las zonas representativas los valores de Cr superan los límites máximos para suelos agrícolas, sin embargo, la concentración del resto de elementos no supera la norma regulatoria de la US EPA (2024) y la NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004 (2007).

Cuadro 1. Concentraciones medias de metales pesados en suelos irrigados con aguas pertenecientes a la subcuenca del Alto Balsas, Puebla y Tlaxcala.

Zonas	Ba mg kg^{-1}	Cd mg kg^{-1}	Co mg kg^{-1}	Cr mg kg^{-1}	Cu mg kg^{-1}	Ni mg kg^{-1}	Pb mg kg^{-1}	V mg kg^{-1}	Zn mg kg^{-1}
I	162.1 c* (±41.27)	3.33 b (± 0.19)	6.23 b (± 0.6)	29.45 c (± 5.1)	14.47 b ± (2.62)	19.48 b (± 1.97)	19.69 a (± 6.76)	34.93 c (± 7.24)	53.15 b (± 5.64)
II	91.15 b (± 43.65)	3.32 b (± 0.16)	9.51 c (± 0.75)	20.02 b (± 5.9)	13.05 b (± 1.81)	18.31 b (± 2.28)	65.83 b (± 6.26)	25.89 b (± 8.76)	28.28 a (± 16.74)
III	64.67 a (± 28.87)	2.45 a (± 0.61)	3.35 a (± 2.48)	13.9 a (± 6.39)	9.36 a (± 2.95)	7.52 a (± 6.74)	20.07 a (± 18.12)	14.98 a (± 7.07)	47.52 b (± 8.03)
US EPA (2024) (1)	200	10	20	11	100	50	200	-	1100
SEMARNAT-2004 (2)	5400	37	-	280	-	1600	400	78	-

*Medias con letras iguales indican que no existe diferencia significativa (Tukey p ≤ 0.05); "±" indica la desviación estándar. US EPA (1), Normas regulatorias de metales pesados y detección de contaminantes en suelos.; (2), NOM-

147-SEMARNAT/SSA1-2004 (2), Norma Oficial Mexicana, que establece criterios para determinar concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

A través de la evaluación del *Igeo* (Figura 2a) se identificó una contaminación fuerte en concentraciones de elementos de Cd, Co y Zn; elementos como Cr, Cu y Ni, presentan una contaminación moderada. A través del efluente del Alto Balsas se reciben descargas de residuos de este tipo de industrias contribuyendo a los altos índices de acumulación de metales pesados en suelos (García-Nieto *et al.*, 2011).

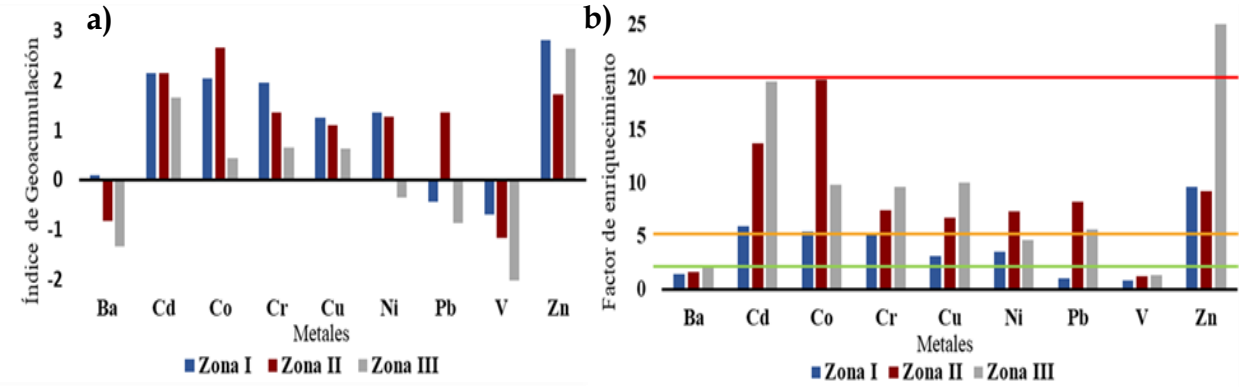


Figura 2. Gráfico de barras indicando el *Igeo* y FE en suelos agrícolas irrigados con aguas del Alto Balsas, Puebla y Tlaxcala. (a) Valores promedio del *Igeo* para metales pesados en las zonas representativas de estudio del Alto Balsas; (b) Valores promedio del FE para metales pesados en las zonas representativas de estudio del Alto Balsas.

A través de la Figura 2b se muestran los valores obtenidos del FE, donde se identifica que todos los elementos, excepto Ba y V, presentan un enriquecimiento significativo, lo que indica la presencia de contaminación antropogénica de acuerdo con la escala de Muller (1969). Las zonas II y III presentan el mayor nivel de enriquecimiento, consistente con una actividad industrial y agrícola frecuente en la zona de estudio.

Los resultados de FE son consistentes con los obtenidos en el *Igeo*, mostrando una contaminación significativa para los elementos como Cd, Co y Zn. El enriquecimiento de Cd y Zn es desconocido, sin embargo, pueden especularse que proviene de fuentes agrícolas, resultantes de aplicaciones intensivas de fertilizantes o agroquímicos (Liu *et al.*, 2023). Los resultados de este estudio muestran una relación con fuentes antrópicas de contaminación y el FE, lo que demuestra el origen de la contaminación en el Alto Balsas como un factor antropogénico.

CONCLUSIONES

La concentración de metales pesados en suelos no rebaso los límites máximos establecidos por la norma mexicana NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004. Sin embargo, la concentración de Cr estaría por arriba de las recomendaciones de la US EPA. Los valores del *Igeo* y el *FE* demuestran que la contaminación de elementos como Cd, Co y Zn está relacionada con fuentes antropogénicas, derivadas de la utilización de aguas residuales para riego.

BIBLIOGRAFÍA

Aytop, H., Koca, Y.K. & Şenol, S. (2023). The importance of using soil series-based geochemil background values when calculating the enrichment factor in agricultural areas. *Environ Geochem Health*, 45, 6215-6230. https://doi.org/10.1007/s10653-023-01640-6.

Ali, S., Mir, R. A., Tyagi, A., Manzar, N., Shankar, K. A., Mushtaq, M., Raina, A., Park, S., Sharma, S., Mir, A. Z., Lone, S.A., Bhat, A. A., Baba, U., Mahmoudi, H. & Bae, H. (2023). Chromium toxicity in plants: signaling, mitigation, and future perspectives. *Plants*, 12, 1502.

Ao, M., Chen, X., Deng, T., Sun, S., Tang, Y., Morel, J. L., Qiu, R. & Wang, S. (2022). Chromium biogeochemical behaviour in soil-plant systems and remediation strategies: A critical review. *Journal of Hazardous Materials,* 424, 127233. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127233.

Cortés-Hernández, J.H. (2021). Origen histórico de la contaminación hídrica y análisis jurídico del río Atoyac. *Tecnología y Ciencias del Agua,* 12(1), 133-191.

Delgado, R. M., Rivera, O. Y., Torres, P. J., Corral, A. A. Y., Flores, M. J. & Santana, C. L.E. (2014). Determinación de cadmio, cromo, plomo y arsénico en suelos superficiales urbanos de Chihuahua, México. *Cultura Científica y Tecnológica*, 11(54) Especial N°1, 189-207.

García-Nieto, E, Carrizales-Yañez, L., Juárez-Santacruz, L., García-Gallegos, E., Hernández-Acosta, E., Briones-Corona, E. & Vázquez-Cuecuecha, O.G. (2011). Plomo y arsénico en la subcuenca del alto Atoyac en Tlaxcala, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(1), 7-17.

Handal-Silva, A., Pérez-Castresana, G., Morán-Perales, J.L. y García-Suastegui, W. (2017). Historia de la contaminación hídrica del Alto Balsas. Revista Desarrollo Urbano Sustentable. 3(9), 10-23.

Liu, Z., Bai, Y., Gao, J. & Lu, J. (2023) Driving factors on accumulation of cadmium, lead, copper, zinc in agricultural soil and products of the North China Plain. *Scientific Reports*, 13, 7429.

López, Z. R de J. y Montalvo, V. R. (2015). Expansión urbana, agua potable y saneamiento en la zona metropolitana Puebla-Tlaxcala (ZMPT). Observatorio Iberoamericano del desarrollo local y la economía social. 9(18).

Mora, A., García-Gamboa, M., Sánchez-Luna, M. S., Gloria-García, L., Cervantes-Avilés, P. y Mahlknecht, J. (2021). A review of the current environmental status and human health implications of one of the most polluted rivers of Mexico: The Atoyac River, Puebla. *Science of the Total Environment,* 782, 146788. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146788.

Muller, G. (1969). Index of Geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *Geo Journal,* 2(3), 108-188.

NOM-021-SEMARNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana). (2002). Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. D. F.: SEGOB.

NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (Norma Oficial Mexicana). (2007). Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación. D.F.: SEGOB.

US EPA. (United States Environmental Protection Agency). (2007). Method 3051a microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. Washington, DC., EUA, 30pp.

US EPA. (United States Environmental Protection Agency). (2018). Method 6010d inductively coupled plasma—optical emission spectrometry. Washington, DC, EUA, 35 pp.

EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE AGREGADOS EN UN ECOSISTEMA SEMIÁRIDO ETNOAGROFORESTAL

Arturo Jiménez Martínez[1]; Noé Manuel Montaño[2]; Susana A. Montaño Arias[2]; Sara Lucía Camargo Ricalde[2]

[1] Posdoctorante SECIHTI en el Departamento de Biología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Av. Ferrocarril de San Rafael Atlixco 186, Leyes de Reforma 1ª Sección, Iztapalapa, 09310, Ciudad de México.
[2] Departamento de Biología, Área de Botánica, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Av. Ferrocarril de San Rafael Atlixco 186, Leyes de Reforma 1ª Sección, Iztapalapa, 09310, Ciudad de México.

Correo del autor de correspondencia: nmma@xanum.uam.mx

RESUMEN

Los sistemas etnoagroforestales (SEAF) semiáridos son reservorios de recursos bióticos y abióticos, pero escasos los estudios sobre la estabilidad de agregados del suelo en el contexto del cambio de uso del suelo, de matorrales a áreas de agricultura intensiva. Este estudio se llevó a cabo en San Luis Atolotitlán, en el Valle semiárido de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla-Oaxaca, México, donde el matorral xerófilo con *Mirtilocactus chichipe* se transformó en SEAF "milpa-chichipera" y áreas de agricultura intensiva. En este estudio se evaluó la estabilidad de los agregados del suelo en tres tipos de uso: matorral xerófilo (MP), islas de vegetación (IV) y áreas abiertas (AA) del SEAF, y áreas de cultivo intensivo (AC). En el suelo del matorral preservado original y de IV del SEAF predominan los macroagregados, mientras que en el CA hubo más microagregados. El diámetro medio ponderado de los agregados fue similar en todos los usos de suelo; sin embargo, esto se debió a la amplia variabilidad en las AA del SEAF. Se concluye que el SEAF favorece la estructura del suelo similar al matorral preservado.

PALABRAS CLAVE: *Agregados estables; áreas abiertas; áreas para cultivo; islas de vegetación; usos de suelo.*

INTRODUCCIÓN

Los sistemas etnoagroforestales (SEAF) ofrecen diversos servicios ecosistémicos como consecuencia del establecimiento de estrategias para la conservación y gestión de la biodiversidad, que incluyen el uso adecuado de sus especies nativas y endémicas a diferentes escalas desde tiempos prehispánicos (Moreno-Calles *et al*., 2012). Sin embargo, en México, el cambio de uso del suelo de ecosistemas naturales a zonas agrícolas ha provocado la pérdida de la biota, con reducciones en la abundancia, riqueza y diversidad de algunos de sus componentes bióticos (Jiménez-Martínez *et al*., 2025; Moreno-Calles *et al*., 2012), por lo que los sistemas etnoagroforestales son una alternativa para la conservación de estos recursos. La degradación del suelo influye negativamente en su fertilidad y, por tanto, en la seguridad alimentaria, por lo que los sistemas etnoagroforestales son alternativas para el mantenimiento y la preservación del recurso

edáfico, propiciando así una producción sostenible (Jinger *et al*., 2024). Dicha fertilidad está relacionada directamente con la formación, la estabilidad y la distribución de agregados, así como con el espacio poroso, disminución de la densidad aparente y la disminución de la erosión, así como la de la escorrentía, lo que incrementa la infiltración de la solución del suelo (García-Orenes *et al*., 2005; Boyle *et al*., 1989).

Los agregados son las unidades estructurales que conforman a todo suelo y son resultado de la interacción entre sus partículas elementales (arenas, limos y arcillas) con sus propiedades físicas, químicas y con la actividad biológica en la que participan las plantas, a través de sus raíces, lombrices, mesofauna, así como bacterias y hongos; los cuales contribuyen activamente en su formación y estabilidad a través de sus interacciones. Ketema y Yimer (2014) reportaron que, al cambiar el uso de suelo de un sistema forestal (SAF) a cultivo agrícola, disminuyen la capacidad de retención de humedad e infiltración y aumenta la densidad aparente (Dap), lo que influye negativamente en la estructura y aireación del suelo. En cambio, en el SEAF, las primeras podrían aumentar y la Dap disminuir en comparación con el suelo bajo agricultura intensiva, como posible consecuencia de un incremento en la agregación asociada que su biota mantiene los procesos físicos y biológicos.

En San Luis Atolotitlán, en el Valle semiárido de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla-Oaxaca, México, se practica un SEAF denominado "milpa-chichipera", que es el resultado de la transformación del matorral xerófilo con presencia de cactáceas columnares como Myrtillocactus chichipe (Rol.-Goss.) P.V. Heath (=Polaskia chichipe), en el que se establece el "sistema Milpa" rodeado por islas de vegetación nativa (Rendón-Sandoval et al., 2024; Moreno-Calles *et al*., 2012).

El objetivo de la presente investigación fue evaluar la estabilidad de los agregados del suelo con diferentes usos de suelo: matorral preservado (MP), SEAF "milpa chichipera" tanto en islas de vegetación (IV) como en áreas abiertas (AA) y áreas destinadas para cultivo agrícola intensivo (AC) en el Valle semiárido de Tehuacán-Cuicatlán (Puebla-Oaxaca, México).

MATERIALES Y MÉTODOS

En cada uso de suelo se colectaron cuatro muestras compuestas de suelo (n= 4) de los primeros 10 cm de profundidad. En total se obtuvieron 12 muestras, correspondientes a la estación seca, en las que se evaluaron los agregados estables en agua. Estos se clasificaron en macroagregados y microagregados con tamaños de > 4.0, 2-4, 1-2, 0.5-1.0, 0.5-0.25 mm y < 0.25-0.03 mm, respectivamente.

La estabilidad de agregados en agua se evaluó con la técnica de Kemper y Rosenau (1986) en la que las muestras, de los diferentes usos de suelo seleccionados, se dejaron secar a la intemperie hasta alcanzar un peso constante. Posteriormente, se pesaron 50 g de muestra de suelo seco, por triplicado, y colocaron en charolas donde se pre-humedecieron con agua destilada y dejaron reposar durante 20 minutos. Posteriormente, se colocaron en una columna de tamices de mayor a menor apertura de malla (>4.0, 2-4, 1-2, 0.5-1.0, 0.5-0.25 y < 0.25 mm) y esta se sumergió durante un minuto a un ciclo por segundo. Además, se realizó la corrección por arenas con hexametafosfato de sodio al

5.0%. Por último, se calculó el diámetro medio ponderado (MWD por su abreviatura en inglés) de los agregados estables en agua por uso de suelo mediante la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{MWD} = \sum_{i=1}^{n} < d > i\, Wi$$

Donde: MWD = diámetro medio ponderado, d= diámetro medio de cada fracción de tamaño i expresado en milímetros, Wi= proporción del peso total de la muestra (g) al peso de los fragmentos gruesos y de arena encontrados en la fracción de tamaño i, n= número de fracciones (mm) > 4.0, 2-4, 1-2, 0.5-1, 0.5-0.25 y < 0.25-0.03.

La influencia del uso de suelo en la estabilidad de agregados y el diámetro medio ponderado se determinó con un ANOVA de una vía seguido de pruebas de comparaciones de medias de Tukey ($p < 0.05$). Los datos se ajustaron a los supuestos de normalidad y homocedasticidad cuando fue necesario, pero se presentan en su escala original de medición. El análisis estadístico se realizó en el programa SAS® versión 9.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La estabilidad de los macroagregados fue mayor tanto en el suelo con matorral preservado como en las IV del SEAF "milpa-chichipera" en comparación con el suelo del AA de este SEAF y las AC (Figura 1A). El suelo de las IV en el SEAF presentó menor porcentaje de microagregados, lo que indica que la dinámica de formación de agregados de mayor tamaño y más estables se está llevando a cabo. Por ejemplo, en la Figura 2B, se observa que se formaron agregados mayores a 4.0 mm en el suelo con matorral preservado y en el SEAF (IV y AA). Asimismo, los agregados estables de 0.5-1.0 mm y de 1.0-2.0 mm fueron mayores en el suelo de matorral preservado y en las IV comparado con las AA del SEAF y las AC (Figura 2B). Rodríguez *et al*. (2021) reportaron que los sistemas etnoagroforestales tropicales secos potencializan la actividad biótica que contribuye a la macroagregación edáfica, lo que a su vez favorece el secuestro de carbono en el suelo.

El diámetro medio ponderado de partícula fluctuó entre los usos de suelo, en el matorral preservado fue 0.75 ±0.026; en el SEAF fue 0.65 ±0.076 en IV y 0.71 ±0.141 en AA; mientras que, en el suelo de CA fue 0.51±0.036, es decir, MP > SAF (AA, IV) > AC. Sin embargo, debido a la alta variación en el suelo de AA del SEAF, no detectaron diferencias estadísticas significativas entre los usos de suelo evaluados (Figura 1C), aunque se observa una tendencia a la disminución en el suelo bajo agricultura intensiva.

Jiménez-Martínez *et al*. (2025) reportaron que, en estos mismos usos de suelo, la riqueza abundancia y diversidad de hongos micorrízicos arbusculares fue significativamente menor en el suelo de las áreas con agricultura intensiva comparado con lo registrado en el SEAF (IV y AA) y en el matorral preservado; de manera que, dado que estos hongos simbiontes contribuyen ampliamente a la formación y estabilidad de agregados en agua como consecuencia del desarrollo de su micelial (Jiménez-Martínez *et*

al., 2024), es posible que la reducción de la agregación esté asociada con su actividad como consecuencia del cambio de uso de suelo.

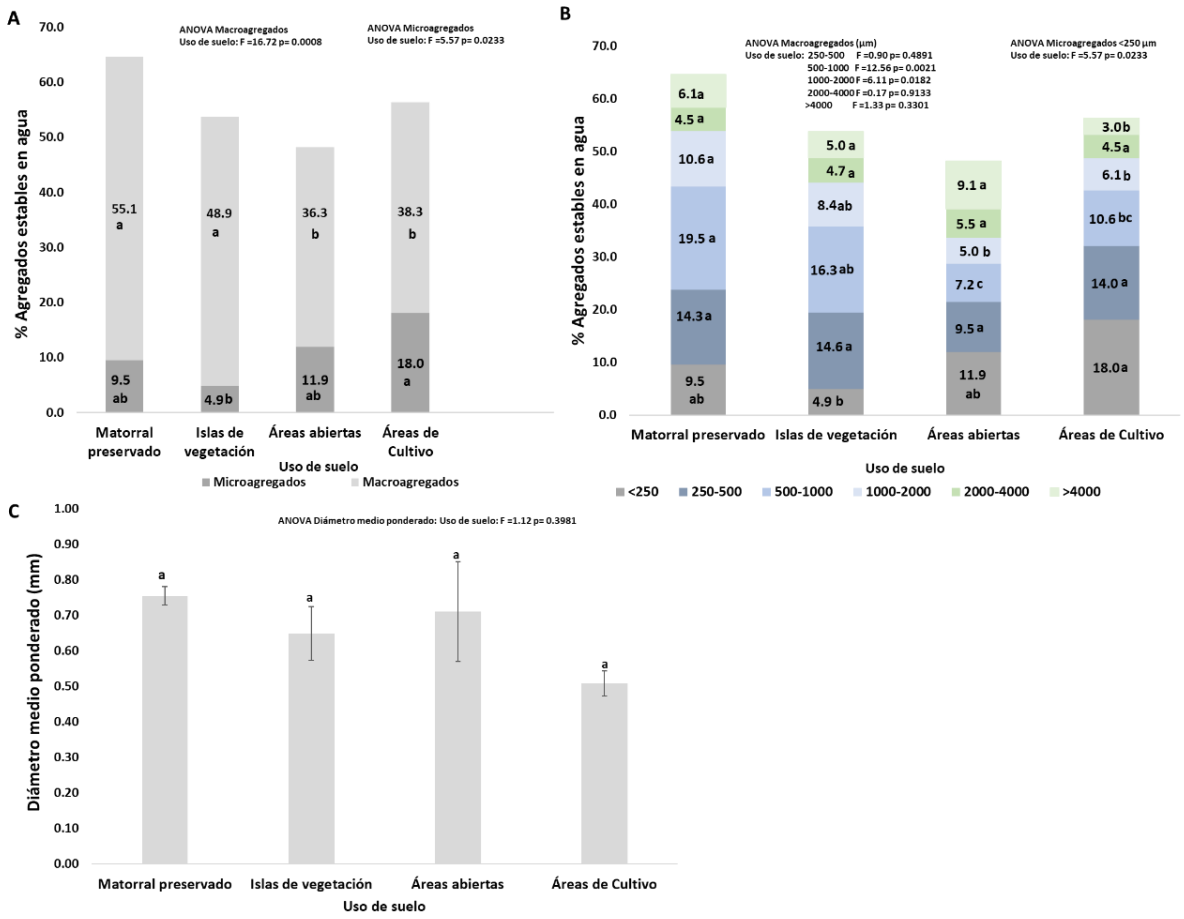


Figura 1. Estabilidad en agua de A) macro y microagregados, B) macroagregados de diferente tamaño y C) diámetro medio ponderado de agregados en diferentes usos de suelo en el Valle semiárido de Tehuacán-Cuicatlán, México.

CONCLUSIÓN

El SEAF "milpa-chichipera" favorece la formación de agregados estables en el suelo en una magnitud similar a la del matorral preservado, por lo que promueve la conservación de la estructura del suelo en el contexto del cambio de uso de suelo a agricultura intensiva. Por tanto, es necesario evaluar los mecanismos de agregación asociados a la actividad de la biota.

BIBLIOGRAFÍA

Boyle, M., Frankenberger Jr, W. T. & Stolzy, L. H. (1989). The influence of organic matter on soil aggregation and water infiltration. *Journal of production agriculture,* 2(4), 290-299. https://doi.org/10.2134/jpa1989.0290

García-Orenes, F., Guerrero, C., Mataix-Solera, J., Navarro-Pedreño, J., Gómez, I. & Mataix-Beneyto, J. (2005). Factors controlling the aggregate stability and bulk density in two different degraded soils amended with biosolids. *Soil and Tillage Research,* 82(1), 65-76. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.06.004.

Jiménez-Martínez, A., del Carmen Gutiérrez-Castorena, M., Montaño, N. M., Gutiérrez-Castorena, E. V., Alarcón, A., & Gavito, M. E. (2024). Micromorphology and thematic micro-mapping reveal differences in the soil structuring traits of three arbuscular mycorrhizal fungi. *Pedobiologia,* 104, 150953. https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2024.150953.

Jiménez-Martínez, A., Montaño, N.M., Chimal-Sánchez, E., Salasar-Orduño, B.L., Villareal G.M., Varela-Fregoso, L.Y., Montaño-Arias, S.A., Camargo-Ricalde, S.L (2005 enviado) Ethno-agroforestry system, "milpa-chichipera", buffers the impact of land use change on arbuscular mycorrhizal fungi in a Mexican semiarid ecosystem. Agroforestry Systems.

Jinger, D., Sirohi, C., Verma, A., Panwar, P., & Kaushal, R. (2024). Perspective Chapter: Agroforestry Strategies for Integrated Soil and Water Conservation in Sustainable Agroecosystems. Principles and Practices. (ed) Singh Meena, V., Swaroop Bana, R., Kishor Fagodiya, R., & Hassanain, M. IntechOpen. http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.1005772.

Kemper, W. D., Rosenau, R. C., 1986. Aggregate Stability and Size Distribution. Methods of soil analysis. Part 1. In: Arnold K. (Ed.) Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Mineralogical Methods, 2nd Ed., American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 425-444. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c17, 1986.

Ketema, H., & Yimer, F. (2014). Soil property variation under agroforestry-based conservation tillage and maize based conventional tillage in Southern Ethiopia. *Soil and Tillage Research,* 141, 25-31.) https://doi.org/10.1016/j.still.2014.03.011.

Moreno-Calles, A. I., Casas, A., García-Frapolli, E. & Torres-García, I. (2012). Traditional agroforestry systems of multi-crop "milpa" and "chichipera" cactus forest in the arid Tehuacán Valley, Mexico: their management and role in people's subsistence. *Agroforestry Systems,* 84, 207-226. https://doi.org/10.1007/s10457-011-9460-x.

Rendón-Sandoval, F. J., Moreno-Calles, A. I., Vallejo, M., Mora, F., Sinco-Ramos, P. G., Campos-Salas, N., ... & Casas, A. (2024). Agrosilviculturas tradicionales que mantienen la diversidad vegetal nativa del Valle de Tehuacán-Cuicatlán: un panorama regional. *Botanical Sciences*, 102(3), 898-922. https://doi.org/10.17129/botsci.3479.

Rodríguez, L., Suárez, J. C., Rodríguez, W., Artunduaga, K. J. & Lavelle, P. (2021). Agroforestry systems impact soil macroaggregation and enhance carbon storage in Colombian deforested Amazonia. *Geoderma,* 384, 114810. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114810.

FORMA Y TAMAÑO DE EDAFOAGREGADOS ESTRUCTURALES EN EL ANP CERRO DE SACROMONTE, ESTADO DE MÉXICO

Berenice Barrientos Ojeda[1]; Citlali Arided López López[1]; Judith Castellanos Moguel[1]; María Flores Cruz[1]; Gilberto Vela Correa[1]

[1]Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, Calzada del Hueso 1100, Colonia. Villa Quietud, Alcaldía Coyoacán, 04960, Ciudad de México.

Correo del autor de correspondencia: gvela@correo.xoc.uam.mx

RESUMEN

El objetivo fue determinar la forma y tamaño de los agregados en los suelos del Área Natural Protegida de Cerro de Sacromonte, a fin de proponer acciones para mitigar su degradación. El cerro de Sacromonte actualmente presenta un deterioro debido a las presiones antropocéntricas y naturales, debido a la urbanización, deforestación, erosión, derrumbes y hundimientos. Además, se debe considerar, que sus suelos son de origen volcánico y una de las propiedades que presentan es su escasa habilidad para formar agregados estructurales estables. Se trabajó en cuatro sitios: S-1. Caja de Agua, S-2. Iglesia Guadalupe; S-3. Tecamaxusco, y S-4. Paraíso. En cada uno se describió un perfil de suelos y se tomaron muestras para su análisis, donde se determinó, su densidad aparente, humedad, textura, materia orgánica (MO), así como la forma, cantidad y tamaño de agregados. En general los agregados presentan una forma de poliedros subangulares, débilmente desarrollados predominando los macroagregados en los horizonte Ah por el contenido de materia orgánica, mientras que a partir de 30 cm de profundidad la MO disminuye predominando los mesoagregados (2.0 a 0.25 mm) y microagregados (<0.25 mm) que son estructuralmente muy sensibles a su colapso y desplazamiento por el agua y gravedad, favoreciendo los procesos de solifluxión en las laderas altas y medias, que bajo condiciones de lluvias frecuentes y extremas puede elevar el riesgo de presentarse ocasionalmente derrumbes, caída de rocas y flujo de lodos.

PALABRAS CLAVE: *deslizamiento de suelos, estructura de suelo, solifluxión, suelos forestales, suelos volcánicos.*

INTRODUCCIÓN

El cerro de Sacromonte es un Área Natural Protegida (ANP) que se encuentra en Amecameca, en el estado de México. Es un lugar de gran belleza natural, que es necesario conservar y en lo posible mejorar sus condiciones ambientales. Lamentablemente, presenta un deterioro debido a las presiones antropocéntricas y naturales en sus alrededores, debido a la urbanización, deforestación, erosión, derrumbes y hundimientos.

Una de las propiedades más importantes de los suelos es la formación de agregados estructurales, que se definen por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arenas, limos y arcillas. Cuando estas partículas se agrupan, toman el aspecto de partículas mayores y se denominan ***agregados***. Su forma, cantidad y estructura del suelo

juegan un papel importante en la aireación, almacenamiento, flujo de agua y nutrientes, así como en la penetración y desarrollo de raíces y estabilidad de los suelos (Meza-Pérez y Geissert-Kientz, 2003). Las causas más importantes de la degradación de la estructura del suelo pueden ser: 1) Expansión de las arcillas durante los períodos húmedos; 2) La lluvia, especialmente si es violenta y produce una dilución pasajera de los cationes que favorecen la floculación de los coloides; 3) La pérdida de materia orgánica; y 4) La acidificación y/o descalcificación del suelo, produce una desestabilización de los microagregados.

Los agregados con características ándicas presentan poca cohesión y son más susceptibles a sufrir daños estructurales debido a que se desintegran fácilmente bajo el efecto de la lluvia o la labranza. Cuando esto sucede, se forma a menudo un encostramiento superficial, que reduce la porosidad e incrementa la erosión. Además, se debe considerar que el Santuario de Sacromonte es el más importante y visitado de la región y toma gran importancia, porqué provee diversos servicios ecosistémicos a la sociedad (FAO, 2015), por lo que es de interés, conservar este sitio por su valor ambiental e histórico, el cual está ligado a las tradiciones de los pueblos de Amecameca, Sacromonte y Tlalmanalco. Sin embargo, los constantes derrumbes, desplazamientos y erosión de los suelos ponen en riesgo la existencia de este patrimonio histórico. Por lo anterior el objetivo de este trabajo es determinar la forma y tamaño de los agregados estructurales del suelo en el ANP Cerro de Sacromonte, en el Estado de México

MATERIALES Y METODOS

El área de estudio. El ANP Cerro de Sacromonte tiene una superficie de 45.19 ha y geográficamente se ubica entre los 19°07'25" y 19°07'50" de latitud norte y 98°46'20" y 98°46'46" de longitud oeste. Tiene un rango altitudinal que va de los 2,450 a 2,580 msnm; y un clima templado subhúmedo, con una temperatura anual de 12° a 18°C y una precipitación de 1,200 mm anuales. En cuanto a su vegetación, destacan los encinos, eucaliptos, fresnos y cedros. Los suelos son de origen volcánico como los Andosols, Regosols y Phaeozems.

Trabajo en gabinete, campo y laboratorio. Se consultaron diversas fuentes de información sobre el lugar de trabajo en reportes técnicos y artículos de investigación. Se realizaron muestreos en las zonas más vulnerables a los procesos erosivos y de deslizamiento, por lo que se consideraron cuatro sitios: S-1. Caja de Agua, S-2. Iglesia Guadalupe; S-3. Tecamaxusco y S-4. Paraíso. En cada sitio se describió morfológicamente un perfil de suelos (Vela-Correa *et al.,* 2010) y se tomaron muestras para su análisis en laboratorio, donde se determinó su densidad aparente, humedad, textura y materia orgánica (MO) con base en Semarnat (2000) y USDA (2004). Para determinar la forma, cantidad y tamaño de agregados del suelo por el procedimiento de Yoder (1936). Las muestras, secas y separadas por horizontes, se pasaron por tamices con mallas de los números 10 a 100, para agruparlas por tamaño en macro (> 2 mm), meso (2.00 a 0.29 mm) y microagregados (< 0.29 mm).

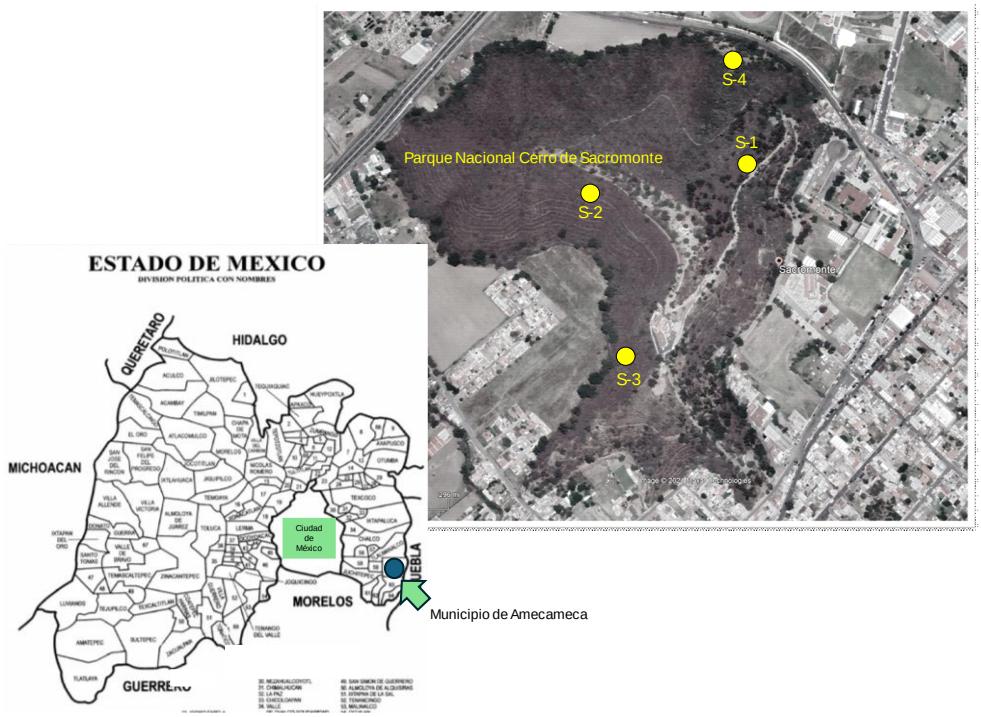


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio y sitios de muestreo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características generales de los suelos. Los sitios S-1. Caja de Agua y S-2. Iglesia Guadalupe, se encuentran en laderas medias, mientras que el S-3. Tecamaxusco en una ladera inferior, y el S-4. Paraíso en una planicie. Todos los suelos se consideran profundos (>65 cm), son ricos en MO proveniente de la acumulación y descomposición de la hojarasca de la vegetación del lugar. Presentan una densidad aparente <1 Mg m^{-3} en los horizontes superiores (Ah y A12) que se incrementa con la profundidad, mientras que en los horizontes AC, C-1 y C-2 es más frecuente la presencia de cenizas volcánicas y en menor cantidad materiales de origen orgánico, lo que los hace muy susceptibles a los procesos erosivos (Cuadro 1).

Los agregados de los suelos. Los macroagregados, se forman en los horizontes Ah por la mayor presencia de MO, y aunque los sitios S-1 y S-2 se encuentran en laderas y estos son más frecuentes de 0 a 20 cm de profundidad, mientras que los sitios S-3 y S-4 corresponden a una ladera baja y planicie donde la MO se duplica fácilmente (Cuadro 1), donde la materia orgánica esta menos expuesta al arrastre por el agua y gravedad, los sitios con peds estructuralmente estables, se pueden encontrar principalmente hasta los 30 cm de profundidad. A partir de los 30 cm de profundidad en el S-1 y S-2 la MO disminuye ≥ 85% lo cual se refleja en la formación de mesoagregados mm) y microagregados estructuralmente muy sensibles a su colapso y desplazamiento por el agua y la gravedad, favoreciendo los procesos de solifluxión en las laderas, que bajo condiciones de lluvias frecuentes y extremas pueden incrementar el riesgo de presentarse derrumbes, caída de rocas y flujo de lodos.

Cuadro 1. Atributos físicos y químicos de los suelos.

Horizonte	Profundidad (cm)	Densidad aparente (Mg m^{-3})	Agregados (mm)	Materia orgánica (%)	Promedio (%)
			S-1. Caja de agua		
			Macro (>2.00)	3.33	
Ah	0 - 10	0.95	Meso (2.0 - 0.25)	5.2	4.74
			Micro (<0.25)	5.7	
			Macro (>2.00)	0.55	
A12	oct-30	0.96	Meso (2.0 - 0.25)	1.55	0.87
			Micro (<0.25)	0.52	
			Macro (>2.00)	0.55	
AC	30 - 86	1.15	Meso (2.0 - 0.25)	0.22	1.16
			Micro (<0.25)	2.7	
			Macro (>2.00)	0.55	
C	>86	1.07	Meso (2.0 - 0.25)	1.51	1.88
			Micro (<0.25)	3.57	
			S-2. Iglesia Guadalupe		
			Macro (>2.00)	5.7	
Ah	0 - 17	0.95	Meso (2.0 - 0.25)	5.24	5.39
			Micro (<0.25)	5.24	
			Macro (>2.00)	3.44	
A12	17 - 50	1.01	Meso (2.0 - 0.25)	3.99	3
			Micro (<0.25)	1.58	
			Macro (>2.00)	0.63	
AC	50 - 83	1.1	Meso (2.0 - 0.25)	0.33	0.68
			Micro (<0.25)	1.09	
			Macro (>2.00)	-	
C	>83	1.05	Meso (2.0 - 0.25)	-	0.05
			Micro (<0.25)	0.1	
			S-3. Tecamaxcuxco		
			Macro (>2.00)	12.79	
Ah	0 - 20	0.85	Meso (2.0 - 0.25)	13.05	12.61
			Micro (<0.25)	12	
			Macro (>2.00)	4.7	
A12	20 - 40	1.06	Meso (2.0 - 0.25)	4.91	4.06
			Micro (<0.25)	2.58	
			Macro (>2.00)	3.43	
C	40 - 63	1.05	Meso (2.0 - 0.25)	4.4	1.15
			Micro (<0.25)	-	
			Macro (>2.00)	3.43	
2A	> 63	1.11	Meso (2.0 - 0.25)	2.66	2.34
			Micro (<0.25)	0.93	
			S-4. Paraíso		
			Macro (>2.00)	11.79	
Ah	0 - 30	0.8	Meso (2.0 - 0.25)	9.96	10.39
			Micro (<0.25)	9.43	
			Macro (>2.00)	3.72	
A12	30 - 50	1.05	Meso (2.0 - 0.25)	3.45	3.14
			Micro (<0.25)	2.24	
			Macro (>2.00)	2.36	
C1	50 - 84	1.02	Meso (2.0 - 0.25)	1.2	1.51
			Micro (<0.25)	0.98	
			Macro (>2.00)	1.38	
C-2	84 - 130	1.09	Meso (2.0 - 0.25)	0.96	1.14
			Micro (<0.25)	1.09	
C-3	>130	1.02	Macro (>2.00)	-	0.48

CONCLUSIONES

Los macroagregados, se forman en los horizontes Ah por la mayor presencia de MO, y son más frecuentes de 0 a 30 cm de profundidad donde se localizan los peds estructuralmente más estables.

A partir de los 30 cm en los suelos de las laderas, la MO disminuye en alrededor del ≥ 85% lo cual se refleja en la formación de meso y microagregados que estructuralmente son muy sensibles a su colapso y desplazamiento por el agua y la gravedad, favoreciendo los procesos de solifluxión, que bajo condiciones de lluvias frecuentes y extremas pueden incrementar el riesgo de presentarse derrumbes, caída de rocas y flujo de lodos

A fin de disminuir el riesgo por deslizamientos se sugiere mantener una cobertura vegetal permanente mediante la plantación de herbáceas y arbustivas, así como de encinos y tepozanes plantados, en curvas de nivel formando terrazas, más la aplicación de abonos con el propósito de fortalecer la formación y estabilidad de los agregados en los suelos de las laderas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los Sres. Gerardo Páez y Roberto Conde Lijandro, integrantes de la Asociación Civil Sacromonte-Chalchiumomozco, A.C., por su disposición, acompañamiento y apoyo durante los trabajos que se realizaron en campo.

BIBLIOGRAFÍA

FAO. 2015. Servicios ecosistémicos y biodiversidad. http://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/culturalservices/es/

SEMARNAT. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos: Estudios, muestreo y análisis.* Diario Oficial de la Federación, 31 de diciembre de 2002, 2ª Sección, México.

USDA. United Service Department Agriculture. (2004). *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey Investigations Rebecca Burt, Editor Report. No. 42 Version 4.0 700 p. 886_12998.pdf.

Vela-Correa, G., Rodríguez Gamiño, M. d. L. & López Blanco, J. (2011). Descripción morfológica de perfiles de suelo: Manual para trabajo en campo. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Ciencias Biológicas y de la Salud.

Yoder, R.E. (1936). A Direct Method of Aggregate Analysis of Soils and a Study of the Physical Nature of Erosion Losses. *Agronomy Journal*, 28, 337-351.

Vargas M. F. (1997). Aspectos físicos, sociales, legales, administrativos, recreativos, biológicos, culturales, situación actual y propuestas en torno a los parques nacionales de México. Parques Nacionales de México. Instituto Nacional de Ecología. Volumen I: Zonas Centro, Occidente y Oriente. Pp. 183-187.

Meza P. E. & Geissert K. D. (2003). Estructura, agregación y porosidad en suelos forestales y -cultivados de origen volcánico del cofre de Perote, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana,* 5 (2): 57-60.

IDENTIFICACIÓN DE BACTERIAS PROVENIENTES DEL PARQUE COMUNAL "EL EPAZOTE" EN COATEPEC, ESTADO DE MÉXICO

Xavier Alberto González Espinoza[1]; Yoana Hedyt Domínguez León[1]; Estephany Guadalupe Rodríguez Reyes[1]; Edith Montes Hernández[1].

[1] Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca. Km 7 de la Carretera Ixtapaluca - Coatepec, CP. 56580, Ixtapaluca, Estado de México.

Correo del autor de correspondencia: edith.mh@ixtapaluca.tecnm.mx

RESUMEN

El suelo es un ecosistema natural fundamental que alberga una gran diversidad de microorganismos, incluyendo bacterias que promueven procesos esenciales para la vida vegetal. El presente estudio se enfocó en aislar y caracterizar bacterias del suelo del Parque Comunal "El Epazote" con el fin de identificar las bacterias que posee y conocer su posible influencia en el ambiente.A través de pruebas bioquímicas, morfológicas y microscópicas estandarizadas se identificaron cinco especies de Enterobacterias: *Klebsiella oxytoca, Citrobacter freundii, Citrobacter koseri, Pantoea agglomerans* y *Enterobacter aerogenes*. Se determinó que algunas bacterias tienen función como promotoras del crecimiento vegetal, capaces de fijar nitrógeno, solubilizar potasio y fosfatos, y producir fitohormonas como el ácido indolacético (AIA). Estos hallazgos sugieren que el suelo del parque contiene una rica comunidad microbiana con un importante potencial para la salud y el desarrollo de la flora local, lo cual es importante para preservar estos ecosistemas.

PALABRAS CLAVE: *Comunidad microbiana; identificación; rizobacterias; suelo.*

INTRODUCCIÓN

El suelo es un cuerpo natural que cubre la mayor parte de la superficie terrestre, constituido por minerales, materia orgánica, agua, arcilla, arena y diferentes organismos como hongos y bacterias (Osuna, 2024). Las bacterias son microorganismos unicelulares, que ayudan a sostener la vida de nuestro planeta y pueden ser benéficas para varios procesos ambientales como promoción del crecimiento de las plantas a través de diferentes mecanismos o pueden ser utilizadas en la biotecnología como biorremediadores (Osuna, 2024). Sin embargo, la creciente degradación de los suelos debido a actividades humanas ha generado tanto la pérdida del ecosistema como la de microorganismos que son benéficos para él.

El presente trabajo se enfocó en obtener, aislar y caracterizar cepas bacterianas que fueron obtenidas de muestras de suelo del Parque comunal "El Epazote" a través de diferentes pruebas microbiológicas, con el objetivo de conocer cuál era la diversidad bacteriana que puede contener los suelos y conocer cuál podría ser su valor ecológico.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio fue en el Parque comunal "El Epazote" ubicado en Coatepec, Ixtapaluca, Estado de México, con coordenadas 19°22´45" N y 98°48´12" W. El muestreo se llevó a cabo de acuerdo a los lineamientos establecidos en la NOM-021-RECNAT-2000. El proceso incluyó un muestreo en forma de zig-zag, apartando los 2 cm primeros de cobertura vegetal, seguido de la capa de descomposición con un color característico café oscuro-negro y manchones blancos, evidenciando el crecimiento microbiano. Se recolectó aproximadamente 1 kg de mantillo, se colocó en bolsas de polietileno con cierre hermético y se llevó al Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca para su análisis. Las muestras se extendieron en charolas para su secado a temperatura ambiente durante cuatro días, posteriormente se tamizaron. Para el aislamiento se prepararon 50 g de agar MacConkey, 38 g de Mueller Hinton, 36 g de EMB y 60 g de Salmonella-Shigella, se esterilizaron en autoclave a 121°C durante 15 minutos a 16 psi y se vaciaron en cajas Petri, se dejaron enfriar y guardaron para su posterior uso.

Método de dilución del suelo. Se realizaron diluciones seriadas, para ello se mezclaron en un matraz Erlenmeyer 10 g de cada muestra de suelo con 90 ml de agua peptonada al 2%, este se dejó en agitación a 37°C y 165 rpm durante siete días. Una vez finalizados los días se tomó 1 ml de la solución y se pasó a un tubo de Falcon el cual contiene 9 ml de agua peptonada estéril, siguiendo este proceso hasta llegar a la concentración 10^{-6}. Para las siembras se tomó 500 microlitros de la solución con concentración 10^{-4} de cada muestra y se sembró en las cajas Petri con diferentes medios de cultivo.

Tinción Gram. Una vez obtenidas las colonias de bacterias en los diferentes medios de cultivo, se procedió a realizar el método de Tinción Gram para su visualización en microscopio posteriormente.

Preparación de pruebas bioquímicas. Se realizaron las siguientes pruebas bioquímicas para determinar a qué género correspondan cada colonia de bacterias: Lisina Hierro Agar (LIA), Simmons Citrato Agar (Citrato), Kliger Hierro Agar (KIA), SIM: Sulfuro de Hidrógeno (S), Indol (I), movilidad (M) y Rojo de metilo/Voges Proskauer (MR-VP).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del Parque Comunal "El Epazote" se lograron aislar 5 enterobacterias provenientes del suelo. Se obtuvo crecimiento de forma circular de 3-4 mm, con un borde entero, elevación convexa suave, textura rugosa, opaca, con presencia de bacilos cortos gramnegativos (Figura 1a y 2a), cuya bioquímica corresponde a *Klebsiella oxytoca*. Así mismo se identificaron dos cepas bacterianas pertenecientes al género Citrobacter, posiblemente de la especie *freundii* identificada como bacilos cortos gramnegativos gruesos, cuya morfología colonial se observa en la Figura 1b y 2b, como colonias circulares de 1-2 mm, con crecimiento en agar SS con precipitación negra en el medio, elevación plana, textura lisa y brillosa. Por otra parte, en la Figura 1c y 2c se observa presumiblemente a *C. Koseri* con una morfología microscópica similar, con la diferencia en la prueba de VP negativa y presencia de gas, con colonias circulares, de borde entero, color amarillo, opaca, brillosa, con textura lisa y elevación plana. Las características

microscópicas de la Figura 1d sugiere la presencia de *Pantoea aglomerrans* con presencia de bacilos largos gramnegativos, con colonias de 1-2 mm de diámetro, borde irregular, ondulado, opaca con textura lisa y ligeramente elevada, de color crema a amarillo tenue que diferente de otra cepa posiblemente *Enterobacter aerogenes* (Figura 1e y 2e) la cual presentó bacilos largos delgados gramnegativos y colonias de 3-4 mm, de crecimiento circular y borde entero, superficie plana, textura lisa con brillo y de color rosa.

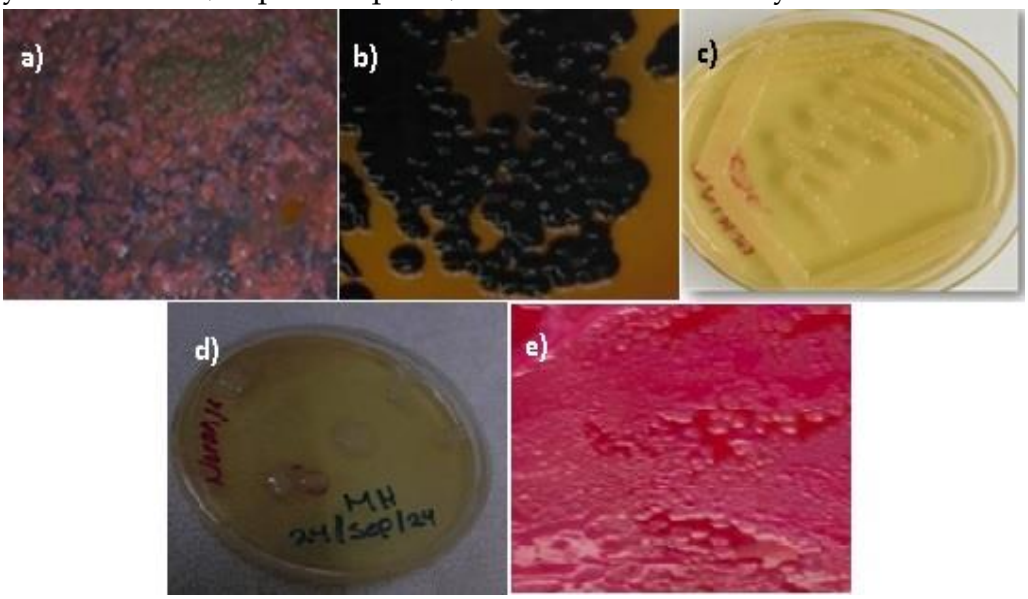


Figura 1: Morfología colonial de las bacterias provenientes de muestras de suelo del parque comunal "El Epazote".

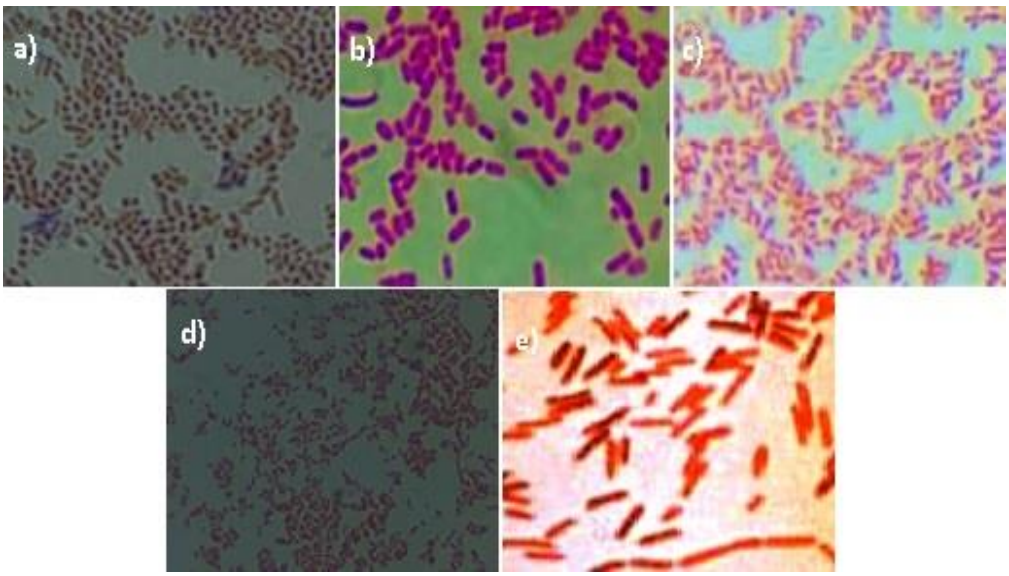


Figura 2: Caracterización microscópica de las bacterias provenientes de muestras de suelo del parque comunal "El Epazote".

En el Cuadro 1, se enlistan las pruebas bioquímicas para identificar las bacterias aisladas, así como los resultados de las mismas.

Cuadro 1. Resultados de pruebas bioquímicas para las cepas aisladas. KIA (+): ácido/ácido, LIA (+): violeta/violeta.

KIA	CITRATO	SIM			LIA	RM	Voges Proskauer	Cepa identificada
		H_2S	IND	MOT				
+	+	+	+	+	+	-	+	*Klebsiella oxytoca.*
+	+	+	-	+	+	+	-	*Citrobacter freundii*
+	+	-	+	+	-	+	+	*Citrobacter Koseri*
+	-	-	-	+	+	+	+	*Pantoea aglomerans*
+	+	-	-	+	+	-	+	*Enterobacter aerogenes*

De acuerdo con los resultados obtenidos en las bioquímicas realizadas y la morfología microscópica, las cepas observadas presumiblemente son las citadas; cabe mencionar que los resultados pueden variar entre cepas (Procop, 2017). En el caso particular de *Klebsiella oxytoca*, la reacción positiva del indol fue la clave para su identificación (Rojo-Alatorre, 2003). En suelos esta cepa actúa como promotora del crecimiento vegetal, ayudando en la fijación de nitrógeno y en la producción de fitohormonas (Carcaño-Montiel *et al.,* 2006).

Por su parte, la especie *Pantoea agglomerans* coincide con los resultados descritos por Winn W.C. *et al.* (2008); Procop, 2017, que actúa como agente de control biológico contra algunos patógenos de plantas y promueve el crecimiento vegetal al producir ácido indol acético (AIA) (Dipika *et al.,* 2023; Chávez-González *et al.,* 2016). La identificación de *Enterobacter aerogenes* y *Citrobacter Freundii y Koseri*, concuerda con la literatura (Procop, 2017; Winn *et al.,* 2008).

El género Enterobacter en suelos promueve la capacidad para solubilizar potasio, macronutriente esencial para el crecimiento de las plantas (Ahmad y Zargar, 2017). Por otra parte, la presencia de Citrobacter contribuye a la diversidad microbiana del suelo participando en procesos de descomposición de materia orgánica.

CONCLUSIONES

A partir del análisis microbiológico de las muestras del Parque Comunal "El Epazote", se logró aislar e identificar cinco especies de enterobacterias provenientes del suelo: *Klebsiella oxytoca, Citrobacter freundii, Citrobacter koseri, Pantoea agglomerans* y *Enterobacter aerogenes*.

Las bacterias identificadas actúan de diversas maneras como protectores y promotores del crecimiento de la flora en el sitio, siendo benéficas para el suelo, lo que nos indica la importancia de preservar la biodiversidad microbiana en estos ecosistemas.

BIBLIOGRAFÍA

Ahmad, M. S. & M. Y. Zargar. (2017). Characterization of potassium-solubilizing bacteria (KSB) in rhizospheric soils of apple (*Malus domestica Borkh.*) in temperate Kashmir. J. Appl. *Life Sci. Int, 15*: 1-7. doi: https://doi.org/10.9734/JALSI/2017/36848.

Carcaño-Montiel, M.G., Ferrera-Cerrato, R., Pérez-Moreno, J., Molina-Galán, J.D. & Bashan, Y. (2006). Actividad nitrogenasa, producción de fitohormonas, sideróforos y antibiosis en cepas de Azospirillum y Kliebsella aisladas de maíz y teocintle. *Tierra Latinoamericana, 24* (4): 493-502.

Chávez González, J. D., Rodríguez Barrera, M. Á., Romero Ramírez, Y., Ayala Sánchez, A., Ruvalcaba Ledezma, J. C. & Toribio-Jiménez, J. (2016). Pantoea agglomerans productora de biosurfactante aislada de rizosfera de pastos Tanzania y Llanero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *7*(4), 961-968. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000400961&lng=es&tlng=es.

Dipika P., Chaudhari R.G.,Zala D.B., Kshipra C., Patel P.M., Dhruv D., Dhaval P. y Bhatt S.A. (2023). Pantoea: A Versatile Bacterial Candidate of Agricultural Importance. *Journal of Advanced Zoology, 44* (2): 403-413. *ISSN: 0253-7214.*

Osuna Salas, L. F. (2024). Bacterias fitopatógenas asociadas al cultivo de maíz (*Zea mays L.*) en el norte de Sinaloa, México. Tesis para obtener el grado de Maestro. Universidad Autónoma de Sinaloa. Culiacán, Sinaloa. México. 71 pp.

Rojo Alatorre, M.G. (2003). Adaptación de un método miniaturizado para la identificación de enterobacterias y pseudomonas para su uso en docencia e investigación. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 90 pp.

Winn, W. C., Allen, S. D., Janda, W. M., Koneman, E. W., Procop, G. W., Schreckenberger, P. C., & Woods, G. L. (2008). Enterobacteriaceae. En Médica Panamericana (Ed.), Koneman Diagnóstico Microbiológico Texto y Atlas en color. 6ta Edició, 204–280.

IDENTIFICACIÓN DE HONGOS MICROSCÓPICOS DE SUELO DEL PARQUE COMUNAL EL EPAZOTE, ESTADO DE MÉXICO

Xavier Alberto González Espinosa[1]; Yoana Hedyt Domínguez León[1]; Estephany Guadalupe Rodríguez Reyes[1]; Edith Montes Hernández[1]

[1] Tecnológico Nacional de México. Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca. Km. 7, Carretera Ixtapaluca-Coatepec, C.P. 56580, Ixtapaluca, Estado de México.

Correo del autor de correspondencia: edith.mh@ixtapaluca.tecnm.mx

RESUMEN

El suelo alberga numerosos organismos, desde insectos y lombrices visibles a simple vista, hasta bacterias y hongos microscópicos. Estos organismos trabajan para el agricultor, por lo que se consideran de suma importancia. Los hongos microscópicos tienen estilos de vida muy variados; pueden vivir en el suelo, desintegrando la materia orgánica, o bien, pueden establecer relaciones benéficas (sinérgicas) o antagónicas (no favorables) con plantas, animales, insectos, otros hongos y bacterias. Mantener sus interacciones con los organismos en los que viven y con su ambiente es muy importante para la estabilidad de los ecosistemas. El muestreo del suelo para el aislamiento e identificación de hongos se realizó en el Parque comunal el Epazote a través de trampas de arroz cocido, se realizaron diluciones de $1x10^{-1}$ hasta $1x10^{-6}$, se colocaron en agar papa-dextrosa- avena y Sabouraud por 7 días, se realizó tinción con azul de metilo para observar sus estructuras. Los hongos microscópicos identificados en el Parque Comunal el Epazote de Coatepec del Estado de México fueron: *Penicillium* sp., *Thichoderma* sp., *Absidia* sp., *Paecilomyces* sp., *Mucor* sp., *Fusarium oxysporum* y *Geotrichum candidum*. La mayoría de los hongos a excepción de Fusarium y *Mucor* son microorganismos que tienen funciones importantes como son capacidad de adaptación y producción de metabolitos, como enzimas, compuestos promotores de crecimiento vegetal, y compuestos volátiles, entre otros, de interés biotecnológico y ambiental dentro del suelo.

PALABRAS CLAVE: *funciones; microorganismos.*

INTRODUCCIÓN

Existen millones de formas de vida en una pequeña porción del suelo que permiten el funcionamiento de los ecosistemas, los diferentes ciclos biogeoquímicos y el bienestar social. Entre ellas se encuentran los hongos, organismos descomponedores, principalmente de la lignina y la celulosa (componentes primarios de la madera), así como recicladores de nutrientes, ya que transforman la materia y degradan agentes contaminantes introducidos al suelo (Camargo *et al*., 2012).

En general, estos microorganismos pueden actuar como bioestimulantes y biofertilizantes ya que producen hormonas que ayudan a promover el crecimiento vegetal ya que están involucradas en diversos procesos como la germinación, crecimiento de flores, tallos y hojas, así como el tamaño del fruto; de ahí el interés de incorporarlos en

la agricultura. El uso de hongos en la agricultura es una práctica cada vez más utilizada, esto representa un gran avance en la búsqueda de soluciones para mejorar el suelo y en el control de agentes patógenos.

Los hongos son esenciales para la conservación del suelo, así como para las raíces de las plantas, ya que entre 90-95% de las plantas terrestres crean relaciones simbióticas formando micorrizas para la producción de hormonas, clorofila, tolerancia al estrés abiótico y biótico, y la obtención de nutrientes (en ocasiones provocan un crecimiento más rápido de la raíz para absorber nutrientes como potasio y fósforo), y que el hongo capture el carbono y el nitrógeno necesarios para su desarrollo, favoreciendo la captación de CO_2 del planeta (Paillacho, 2014; Camargo *et al*., 2012; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, s.f.). El objetivo de la investigación fue identificar las especies de hongos presentes en el suelo con la finalidad de conocer las funciones biológicas de cada una de las especies.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El sitio de muestreo está ubicado en el "Parque Comunal El Epazote" ubicado en el cerro de Coatepec Ixtapaluca, Estado de México con las coordenadas 18.380242, - 98.801302. Este trabajo se desarrolló siguiendo los lineamientos establecidos en la NOM-021- RECNAT-2000, la cual establece las especificaciones técnicas para realizar el muestreo de suelos y obtener información representativa y precisa sobre sus características físicas, químicas y biológicas.

Muestreo de hongos microscópicos. Se colocaron trampas de arroz cocido sin sal a una profundidad de 10 cm, bajo la copa de árboles para asegurar la humedad durante 8 días. Después de este lapso se retiraron las muestras y fueron llevadas al laboratorio de microbiología del Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca.

Aislamiento de los hongos microscópicos. Se realizó a través de diluciones seriadas, donde 1 g de arroz se colocó en 9 ml de agua destilada estéril ($1x10^{-1}$), de esta solución se tomó 1 ml y se colocó en tubo falcón con 9 ml ($1x10^{-2}$) y así sucesivamente hasta obtener una dilución de $1x10^{-6}$, de esta última dilución se tomó 0.5 ml y se colocó en medios de avena, papa-dextrosa y Sabouraud, por vaciado en placa, se dejaron a temperatura ambiente (22 ±2 °C) durante 7 días respectivamente.

Identificación de hongos microscópicos. Una vez obtenidos los hongos se procedió a colocar una muestra en portaobjetos junto con azul de metileno para observar las siguientes estructuras: esporas, tipos de hifas y cuerpo fructífero respectivamente. La identificación se realizó a través de la revisión de artículos científicos (Rafique *et al*., 2025; Sánchez Hernández *et al*., 2018; Visagie *et al*., 2014) así como atlas en línea (https://atlasdemicologia.wordpress.com/2016/03/21/geotrichum-spp/).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dentro de los hongos microscópicos identificados en el Parque Comunal el Epazote de Coatepec del Estado de México fueron: *Penicillium* sp., *Thichoderma* sp., *Absidia* sp., *Paecilomyces* sp., *Mucor* sp., *Fusarium oxysporum* y *Geotrichum candidum* (Figura 1). En este

trabajo se identificaron 4 especies del género *Penicillum*, una de las colonias es color ocre con circunferencia blanca y no presentan pigmento al reverso (Figura 1A flecha negra), la siguiente colonia es color blanca algodonosa y pigmento naranja al reverso (Figura1C, flecha amarilla), otra colonia es amarilla/mostaza, circunferencia blanca y pigmento naranja al reverso (Figura 1D) y la última colonia de *Penicillum* presentó una coloración verde algodonosa con circunferencia blanca y no presentó pigmentos (Figura 1E, flecha blanca) (Rafique *et al*., 2025; Sánchez Hernández *et al*., 2018; Visagie *et al*., 2014) así como atlas en línea (https://atlasdemicologia.wordpress.com/2016/03/21/geotrichum-spp/).

Se identificaron 4 colonias de *Trichoderma* con las siguientes características, colonia verde algodonosa sin pigmentos al reverso (Figura 1A, flecha blanca y 1G), la siguiente es una colonia blanca algodonosa sin pigmento al reverso (Figura 1A. Flecha morada) y colonia verde aterciopelada la cual no presenta pigmentos al reverso (Figura 1C, flecha amarilla). Se identificaron dos colonias de *Mucor* siendo la primera, gris algodonosa con pigmento negro al reverso (Figura 1E, flecha rosa) mientras que la otra colonia es blanco esponjoso sin formación de pigmento (Figura 1H, flecha blanca). El género *Absidia* son colonias amarillas con circunferencia blanca, sin pigmento al reverso y formación de gotas de color rojo (Figura 1B). Se obtuvo una sola colonia del género *Paecilomyces* color blanca seca, presentó geosmina color amarilla, con pigmento amarillo al reverso de la caja (Figura 1C, flecha roja), la colonia de *Fusarium oxysporum* fue color blanco algodonosa, presentó pigmento rojo al reverso y dentro de la colonia (Figura 1H, flecha azul claro) y, por último, la colonia de *Geotrichum candidum* fue blanca seca en forma de pelusa, bordes irregulares sin pigmentos (Figura 1I).

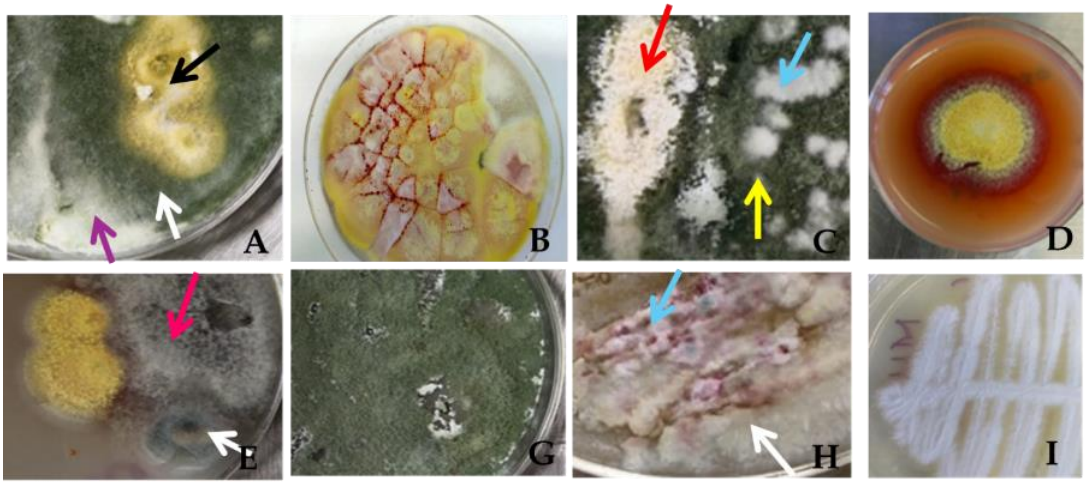


Figura 1. Hongos identificados presentes en el "Parque Comunal El Epazote". A) *Penicillium* (Flecha negra), *Trichoderma* (flecha blanca y morada), B) *Absidia*, C) *Penicillum* sp (flecha azul claro), *Paecilomyces* sp (flecha roja), *Trichoderma* (flecha amarilla), D) *Penicillum* sp, E) *Mucor* sp (flecha rosa), *Penicillum* (flecha blanca), G) *Trichoderma* sp, H) F*usarium oxysporum* (Flecha blanca) y *Mucor* sp (flecha blanca) y I) *Geotrichum candidum* sp. Observadas a 40X.

En cuanto a la estructura microscópica el género *Penicillium* presentó hifas no hialinas, no septadas, esporas redondas pequeñas, grandes y en cadena (Figura 2A -2D), para *Trichoderma* se encontró hifas septadas, hialinas, conidióforo con ramificación cerrada, ramificación abierta (Figura 2E- 2H), *Absidia* presentó hifas delgadas hialinas, no septadas Con una vesícula sin estructuras (Figura 2I), el género *Paecilomyces* presentó hifas hialinas no septadas delgadas, fiálides abundantes, esporas ovaladas alargadas no se tiñen (Figura 2J), en *F. oxysporum se presentaron h*ifas no septadas, monofialides, macroconidias con forma de luna (Figura 2K), mientras que en *G. candidum* las hifas son septadas hialinas que se rompen en cadenas de artroconidios hialinos, lisos, unicelulares, subglobosos a cilíndricos (Figura 2L) y *Mucor* presentó hifas gruesas y delgadas, no septadas, esporas ovaladas teñidas pequeñas esporangios globosos (Figura 2M y 2N).

Dentro de las funciones más importantes de los hongos microscópicos se encuentran como solubilizadores de fosfatos mediante la producción de ácidos orgánicos, disminuyen el pH del suelo, quelación de iones metálicos y producción de enzimas, como es el caso de *Penicillum* sp. (Flores-Gallegos, 2014). Otra especie importante es *Trichoderma* sp., quienes actúan a través de diversos mecanismos que incluyen la competencia por los nutrientes, el hiperparasitismo y la antibiosis de los patógenos. Se trata pues, de hongos benéficos que impiden el desarrollo de los hongos o nematodos causantes de enfermedades en las plantas, como la frutilla (Sánchez-Yáñez *et al*., 2007).

En el caso del género *Paecilomyces*, un hongo que habita el suelo en forma natural y ha demostrado capacidad de regular las poblaciones de nemátodos a niveles no dañinos al cultivo, en algunos casos ha servido como estimulador de desarrollo de las plantas. Este entomopatógeno parasita los huevos, invadiéndolos y después destruyendo sus embriones, evitando así la formación de larvas. También parasita hembras a las cuales les causa la muerte (Carrión y Desgarennes, 2012). En suelos, los hongos del género *Mucor* pueden tener funciones tanto beneficiosas como perjudiciales. Desempeñan un papel importante en la descomposición de materia orgánica y en la liberación de nutrientes, pero también pueden causar enfermedades en plantas y animales. *Geotrichum candidum* ha sido sujeto a numerosos estudios bioquímicos y fisiológicos debido a su ubicuidad y su interés biotecnológico, produce enzimas lipolíticas y proteolíticas; sin embargo, en el suelo es considerado como un hongo patógeno capaz de afectar cultivos.

Finalmente, es importante recalcar que los hongos son cruciales para la salud y funcionamiento del suelo, actuando como descomponedores, recicladores de nutrientes y formando relaciones simbióticas con las plantas, lo que los convierte en elementos clave para la productividad de los ecosistemas terrestres.

CONCLUSIONES

Se logró aislar e identificar 8 géneros de hongos microscópicos dentro de los cuales se encuentran *Penicillium sp*., *Cladosporium cladosporioides*, *Thichoderma s*p., *Absidia s*p., *Paecilomyces lilacinus*, *Mucor* sp., *Fusarium oxysporum* y *Geotrichum candidum.* De los 8 géneros, 6 corresponden a hongos benéficos y 2 a hongos patógenos, respectivamente.

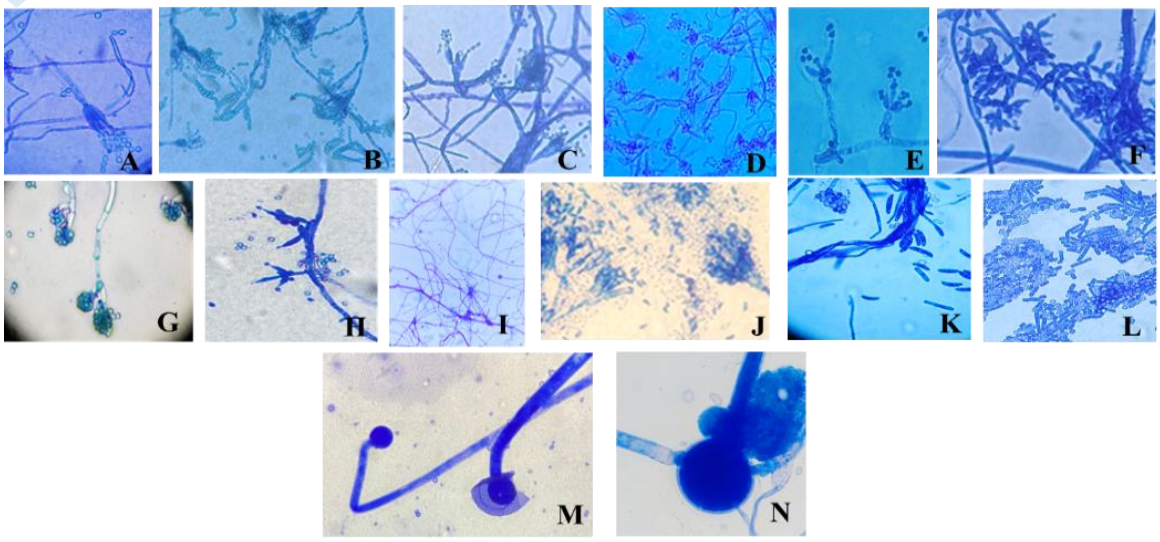


Figura 2. Características microscópicas de los hongos a través de tinción azul de metileno A-D) *Penicillium* sp., E-H) *Thichoderma* sp., I) *Absidia* sp., J) *Paecilomyces lilacinus*., K) *Fusarium oxysporum,* L) *Geotrichum candidum,* M-N) *Mucor* sp.

BIBLIOGRAFÍA

Camargo, S.; Montaño, M.; De la Rosa, C; Montaño, S. (2012). Micorrizas: una gran unión debajo del suelo. *Revista Digital Universitaria*, 13(7), 4. https://www.revista.unam.mx/vol.13/num7/art72/art72.pdf.

Carrión, G; Desgarennes, D. 2012. Efecto *de Paecilomyces lilacinus* en Nemátodos de Vida Libre Asociados a la Rizósfera de Papas Cultivadas en la Región del Cofre de Perote, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 30 (1): 86-90.

Flores-Gallegos, A.C., Veana-Hernández, F. & Rodríguez-Herrera, R. (2014). *Penicillum* como solubilizador. Biofertilizantes microbianos (pp.21) Edition: 1 Chapter: 9.

Diario Oficial de la Federación (2002). NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos.

Paillacho, F. (2014). Evaluación de la efectividad de las micorrizas arbusculares nativas sobre el desarrollo y estado nutritivo del palmito (*Bactris gasipaes* hbk) en etapa de vivero, en Santo Domingo de los Tsáchilas. Tesis de maestría. Escuela Politécnica del Ejército, Ecuador.

Rafique, K., Shabbir, G. & Naz, F. (2015). DNA sequence analysis, morphology and pathogenicity of Fusarium oxysporum f. sp. lentis isolates inciting lentil wilt in Pakistan. *International Journal of Biosciences,* 7(6):74-91.

Sánchez Hernández, L; Arias Mora RM; Rosique Gil JE; Pacheco Figueroa CJ. 2018. Diversidad del género Trichoderma (Hypocraceae) en un Área Natural Protegida en Tabasco, México. *Acta botánica mexicana,* 123: 167-182.

Sánchez-Yáñez J.M. Breve tratado de microbiología agrícola, teoría y práctica, Ed. Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. COSUSTENTA, SA de CV, CIDEM, SEDAGRO. Morelia, Mich., México; 2007. p. 111.

Visagie, C.M., Houbraken, J., Frisvad, J.C., Hong, S.B., Klaassen. C.H.W., Perrone, G., Seifert, K.A., Varga, J., Yaguchi, T. & Samson, R.A. (2014). Identification and nomenclature of the genus *Penicillium*, 78: 343-371.

INTEMPERISMO ACELERADO DE MATERIALES TÉCNICOS: CAMBIOS DE COLOR COMO INDICADORES DE ESTABILIDAD SUPERFICIAL

Thalita Fernanda Abbruzzini[1]; Alan Emmanuel Ortiz Romero[2]; Blanca Lucia Prado Pano[1]; Lucy Mora Palomino[1]; Milton Carlos Soto Barajas[1]; Denisse Archundia Peralta[1]

[1] Instituto de Geología, Departamento de Ciencias Ambientales y del Suelo, Universidad Nacional Autónoma de México, C.P. 04510, Ciudad de México, México.
[2] Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

Correo del autor de correspondencia: thalita@geologia.unam.mx

RESUMEN

El presente estudio analiza el efecto del intemperismo acelerado sobre diferentes materiales técnicos utilizados en la construcción de Technosols. Los materiales seleccionados fueron sometidos a pruebas de intemperismo en una cámara SUNTEST XLS+ para simular condiciones extremas de radiación solar, temperatura y humedad, representando un año de intemperismo natural. Los cambios en el color de las muestras se evaluaron utilizando un espectrofotómetro ColorLite SPH870 en el espacio de color CIELAB, tanto antes como después del intemperismo. Los resultados mostraron diferencias significativas en el color de algunos materiales, con valores de ΔE que indicaron cambios visibles al ojo humano, lo que sugiere modificaciones en las propiedades superficiales de los materiales debido al intemperismo.

PALABRAS CLAVE: *CIELAB; degradación de materiales; SUNTEST XLS+; ΔE.*

INTRODUCCIÓN

El intemperismo comprende procesos físicos, químicos y biológicos que modifican la composición, textura y color de materiales expuestos a la atmósfera. Factores como radiación solar, temperatura y humedad son sus principales agentes, actuando sobre rocas naturales, productos sintéticos y residuos (Goudie, 2013; Meierding, 1993). En suelos, el intemperismo es clave en su formación, evolución y liberación de nutrientes esenciales, determinando fertilidad y capacidad de sustentar vegetación (White y Brantley, 2003; Birkeland, 1999).

En el laboratorio, las pruebas de intemperismo acelerado permiten simular condiciones extremas y observar transformaciones en plazos cortos (Kropat *et al*., 2020). La resistencia y estabilidad de los materiales técnicos deben evaluarse antes de su aplicación (Morel *et al*., 2005). Este enfoque resulta particularmente útil para analizar materiales empleados en la construcción de Technosols, definidos por la WRB (IUSS Working Group, 2022) como suelos elaborados artificialmente a partir de residuos urbanos e industriales con fines de restauración ecológica y agrícola (Séré *et al*., 2008). De

este modo, es posible evaluar cómo la radiación solar y la temperatura afectan componentes como biocarbón, compost, concreto o tabique (Abbruzzini *et al.*, 2022).

Los cambios inducidos incluyen modificaciones físicas y variaciones de color, que reflejan transformaciones químicas y mineralógicas (Almeida *et al.*, 2021). El análisis en el espacio CIELAB, técnica estandarizada (CIE, 1986), permite cuantificar alteraciones en luminosidad (L*), tonos rojo-verde (a*) y amarillo-azul (b*), asociadas con oxidación o degradación (Razali *et al.*, 2022).

Este estudio evalúa el impacto del intemperismo acelerado en materiales técnicos usados como componentes de Technosols (WRB), simulando un año de exposición a condiciones ambientales de la Ciudad de México con una cámara SUNTEST XLS+. Posteriormente, se cuantificaron cambios de color en CIELAB con espectrofotometría, relacionándolos con procesos de intemperismo. El análisis aporta información para optimizar tecnosoles más duraderos y sostenibles (Birkeland, 1999).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó una cámara de intemperismo acelerado SUNTEST XLS+ para simular condiciones extremas de radiación solar, temperatura y humedad. Los parámetros de irradiancia y exposición se ajustaron para representar un año de intemperismo natural en condiciones aceleradas, con una radiación constante de 550 W/m² y temperatura de 45 °C, la mínima permitida por el equipo. Las pruebas se realizaron en placas Petri estándar de 90 mm con humectación diaria para mantener la humedad al 60% de la capacidad de campo, mientras que la simulación de precipitación se descartó por riesgo de contaminación cruzada.

Se evaluaron materiales individuales (biocarbón, compost, madera triturada, tabique rojo, polvo de tromel, tabla de yeso, concreto grueso) y una mezcla experimental de materiales técnicos, diseñada como un prototipo de Technosol en el sentido de WRB. Esta mezcla aún no corresponde a un suelo desarrollado, sino a una combinación inicial que podría evolucionar hacia un Technosol tras su implementación en campo. Su composición fue de 20% compost, 20% madera, 5% biocarbón, 30% concreto, 10% tabla de yeso, 10% tromel y 10% tabique, con dos réplicas (n = 2) por muestra. Cada muestra fue sometida a 621 horas de intemperismo, equivalente a un ciclo anual acelerado.

El color se midió antes y después del intemperismo con un espectrofotómetro ColorLite SPH870 en el sistema CIELAB. Se calibró el equipo con el estándar BAM 6E0116b, registrándose valores de L* (luminosidad), a* (verde-rojo) y b* (azul-amarillo). Posteriormente, se calculó el cambio total de color (ΔE) mediante la fórmula estándar.

Se ajustaron modelos lineales para cada parámetro de color, considerando como factores el material y el estado (intemperizado/no intemperizado), incluyendo su interacción. Un ANOVA permitió evaluar la significancia de los efectos principales y la interacción. Se aplicaron comparaciones múltiples post-hoc con emmeans y ajuste de Tukey para controlar el error tipo I. Se calcularon ΔL, Δa, Δb y ΔE, identificando los materiales con mayor variación de color tras el intemperismo acelerado. Los resultados se representaron gráficamente en el espacio CIELAB, mostrando diferencias claras en la respuesta de cada material.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros de color en el espacio CIELAB revelaron diferencias significativas entre materiales técnicos y el efecto del intemperismo acelerado sobre su apariencia. En la luminosidad (L*), se detectó un efecto significativo del material, el estado de intemperizado y su interacción ($p < 0.05$, $F = 45.67$). Materiales inorgánicos como el concreto y el tabique rojo mostraron una marcada disminución en L* (oscurecimiento), mientras que materiales orgánicos como biocarbón y compost presentaron ΔL bajos, evidenciando mayor estabilidad superficial (Figura 1 y 2). El parámetro a* (verde-rojo) también mostró efectos significativos e interacción ($p < 0.05$, $F = 32.89$). El polvo de tromel y la mezcla tendieron a valores más altos de a*, reflejando un viraje hacia tonos rojizos, posiblemente asociado con oxidación de componentes metálicos. En contraste, biocarbón y madera triturada mantuvieron estabilidad en este eje cromático (Fig. 1 y 2). En b* (azul-amarillo), la variabilidad fue mayor y la interacción significativa ($p < 0.05$, $F = 28.13$). El tabique rojo y el tromel tendieron hacia valores más altos (amarillamiento), mientras que concreto y tabla de yeso no mostraron cambios relevantes (Figura 1).

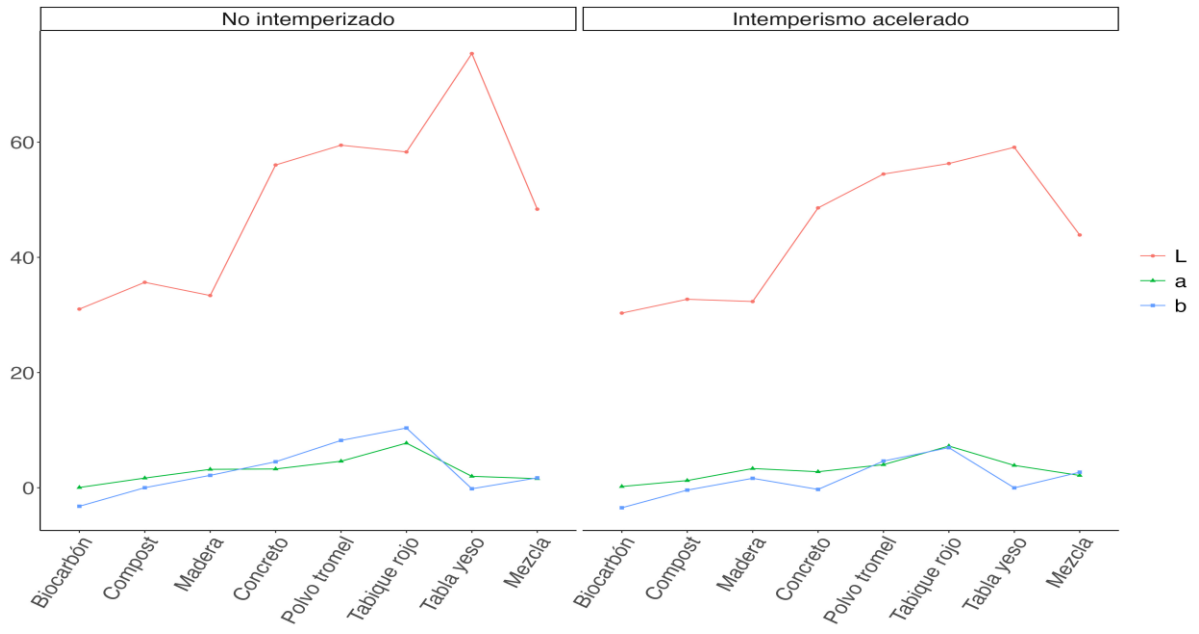


Figura 1. Comparación de los parámetros de color CIELAB (L, a, b) entre muestras no intemperizadas y sometidas a intemperismo acelerado. La Figura 1 muestra las diferencias en los valores de luminosidad (L*), componente verde-rojo (a*) y componente azul-amarillo (b*) para ocho materiales: biocarbón, compost, madera, concreto, polvo de tromel, tabique rojo, tabla de yeso y mezcla. Se presentan dos escenarios: sin intemperizar (izquierda) e intemperizado de manera acelerada (derecha).

El cambio total de color (ΔE) fue más alto en materiales inorgánicos (concreto, tabique rojo y tromel), con valores > 5, perceptibles al ojo humano, lo que indica alteraciones superficiales notables. Por su parte, los materiales orgánicos (biocarbón, compost)

mantuvieron ΔE bajos, confirmando mayor resistencia visual al intemperismo (Figura 2). En síntesis, los materiales inorgánicos mostraron mayor susceptibilidad a cambios cromáticos visibles, mientras que los orgánicos se mantuvieron más estables. Estos resultados confirman que la evaluación de intemperismo debe centrarse primero en los materiales técnicos individuales antes de su incorporación a mezclas para la construcción de Technosols, ya que no todos estos materiales desarrollan estructura edáfica por sí mismos.

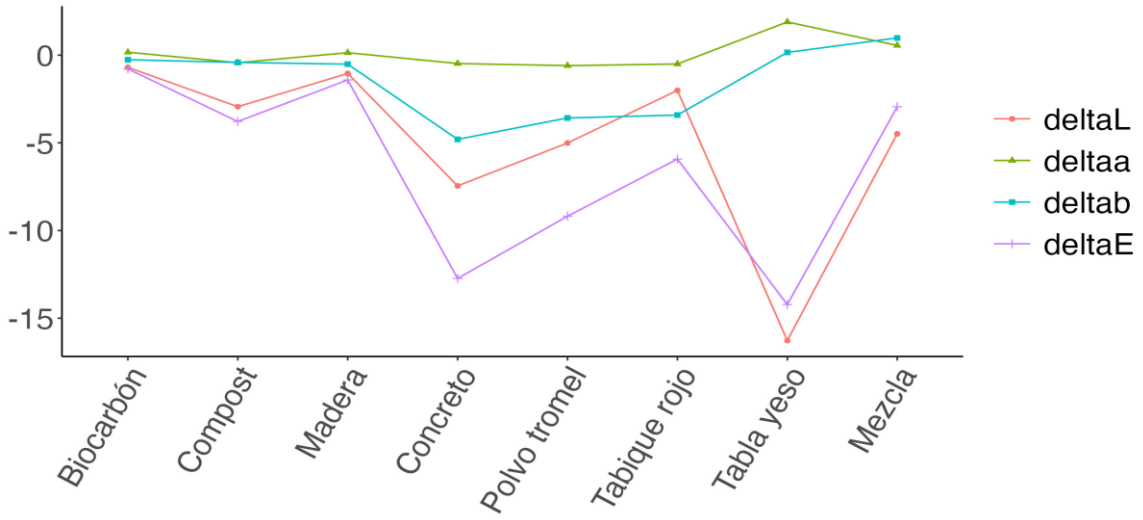


Figura 2. Cambios en los parámetros de color ΔL, Δa, Δb* y ΔE en muestras sometidas a intemperismo acelerado.

La gráfica muestra las diferencias en los parámetros de color (luminosidad L*, componente verde-rojo a*, componente azul-amarillo b*) y el cambio total de color ΔE entre el estado intemperizado y no intemperizado para diversos materiales: biocarbón, compost, madera, concreto, polvo de tromel, tabique rojo, tabla de yeso y mezcla. Un valor ΔE más alto indica un cambio perceptible en el color tras el intemperismo acelerado, mientras que las variaciones en ΔL*, Δa*, y Δb* permiten identificar los cambios específicos en luminosidad y tonalidades.

CONCLUSIONES

El intemperismo acelerado generó cambios significativos en los parámetros de color CIELAB de los materiales técnicos analizados.

Concreto, tabique rojo y polvo de tromel mostraron oscurecimiento marcado (descenso en L*) y valores altos de ΔE.

Biocarbón y compost presentaron menor variación de color y mayor estabilidad superficial.

La combinación de materiales orgánicos e inorgánicos ofrece un potencial para mejorar la durabilidad de los Technosols, aunque los resultados aquí reportados corresponden al nivel de materiales individuales.

Los resultados aquí presentados corresponden al nivel de materiales técnicos individuales y de una mezcla experimental concebida como prototipo de Technosol, sin implicar que dichos materiales constituyan por sí solos un suelo formado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dra. María Yazmín Rivera Uria por su valioso apoyo en la realización de los análisis de color utilizando el espectrofotómetro ColorLite SPH870, cuya contribución fue fundamental para el desarrollo de este estudio. Asimismo, se agradece al Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el respaldo técnico, logístico y de financiamiento proporcionado durante la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Abbruzzini, T.F., Reyes-Ortigoza, A.L., Alcántara-Hernández, R.J., Mora, L., Flores, L. & Prado, B. (2022). Chemical, biochemical, and microbiological properties of Technosols produced from urban inorganic and organic wastes. *Journal of Soils and Sediments,* 22, 745–756. https://doi.org/10.1007/s11368-021-03062-2.

Almeida, T. H. de, Almeida, D. H. de, Gonçalves, D., & Lahr, F. A. R. (2021). Color variations in CIELAB coordinates for softwoods and hardwoods under the influence of artificial and natural weathering. *Journal of Building Engineering, 35*, 101965. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101965

Birkeland, P.W. (1999). Soils and Geomorphology. Oxford University Press.

CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) (1986). Colorimetry (2nd ed.). CIE Publication No. 15.2. Vienna.

Goudie, A.S. (2013). The Human Impact on the Natural Environment: Past, Present, and Future. Wiley-Blackwell.

Kropat, M., Hubbe, M. A., & Laleicke, F. (2020). Natural, accelerated, and simulated weathering of wood: A review. *BioResources,* 15(4), 9998–10062.

Meierding, T.C. (1993). Marble tombstone weathering and air pollution in North America. *Annals of the Association of American Geographers,* 83(4), 568-588.

Morel, J.L., Schwartz, C., Séré, G. (2005). Urban soils: properties and challenges. Encyclopedia of Soils in the Environment, 202-208.

Razali, M., Ismail, M. A. M., Yusoff, I. N., Tobe, H., Miyoshi, T., Date, K., & Yokota, Y. (2022). Analysis of rock mass surface colour using CIELAB and Munsell chart. In The 9th AUN/SEED-Net Regional Conference on Natural Disaster (RCND 2021). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 1091(1), 012048. IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1091/1/012048

Séré, G., Ouvrard, S., Schwartz, C., Renat, J.C., Morel, J.L. (2008). Soil construction: a step for ecological reclamation of derelict lands. *Journal of Soils and Sediments*, 8, 130-136.

White, A.F., Brantley, S.L. (2003). The effect of time on the weathering of silicate minerals: Why do weathering rates differ in the laboratory and field? *Chemical Geology,* 202, 479-506.

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE UN SUELO DE MONTAÑA Y UN SUELO CONTAMINADO

Jessica Paola Cuevas Jimenez[1]; Xavier A. González Espinoza[1]; Yoana H. Domínguez León[1]; Estephany G. Rodríguez Reyes[1]; Edith Montes Hernandez[1]

[1] Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca. Km 7 de la Carretera Ixtapaluca - Coatepec, C.P. 56580, Ixtapaluca, Estado de México.

Correo del autor de correspondencia: edith.mh@ixtapaluca.tecnm.mx

RESUMEN

El suelo es un sistema natural complejo, fundamental para el sostenimiento de la vida en la Tierra. Su composición incluye una mezcla de minerales, materia orgánica y una vasta comunidad microbiana, la cual determina su salud y funcionalidad ecológica. Sin embargo, la creciente degradación de los suelos, causada por actividades humanas y otros factores, representa una amenaza significativa para estos ecosistemas. En este contexto, la caracterización físico-química de los suelos es una herramienta esencial por lo que el presente estudio se enfocó en determinar las diversas propiedades del suelo en una Montaña de Amecameca en el Estado de México y un suelo contaminado por una Tabiquera, con el fin de evaluar el estado en el que se encuentran y su respuesta a las condiciones del entorno. Estos hallazgos evidencian que el suelo de Amecameca a pesar de no mostrar una mayor capacidad de retención de agua (2%), sí contiene mayor actividad microbiana (4.44 mg C-C02 kg^{-1} suelo seco $día^{-1}$) comparado con el suelo de la tabiquera con 48% de retención y una actividad de 2.06 mg C-C02 kg^{-1} suelo seco $día^{-1}$. Por lo que esta investigación demuestra que el suelo de Amecameca tiene mejores condiciones y que existe una interconexión entre los parámetros físicos y químicos del suelo y la salud del ecosistema. De esta forma, este trabajo busca contribuir al conocimiento sobre las propiedades del suelo en las áreas de estudio, proporcionando una base para futuras estrategias de manejo y conservación que permitan restaurar la salud del ecosistema edáfico.

PALABRAS CLAVE: *Actividad microbiana; biomasa; pH; textura.*

INTRODUCCIÓN

Además del agua y el aire, el suelo es considerado uno de los tres componentes importantes para conocer la calidad ambiental (Büneman *et al.*, 2018). Entre sus funciones, es el principal reservorio de C en los ecosistemas terrestres, teniendo un importante papel en la mitigación del cambio climático (Mehna *et al.*, 2018). El suelo puede describirse por sus características físicas, químicas y biológicas está compuesto por minerales, materia orgánica, aire, agua y organismos como bacterias, levaduras, hongos y actinomicetos (Medina-Savedra *et al.*, 2021). Cada una de estas características puede verse afectada por factores como el clima, el relieve, la roca madre, el tiempo, los organismos y la actividad antrópica (Medina-Savedra *et al.*, 2021). Comprender la compleja interacción que existe

entre los parámetros físicos y químicos y la biomasa es esencial para poder analizar y avaluar la importancia ecológica de estos ecosistemas, con el fin de desarrollar y promover nuevas prácticas sustentables. La presente investigación buscó caracterizar las propiedades físicas y químicas de un suelo de montaña y uno contaminado para poder obtener una visión más clara de la salud del ecosistema.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. Los muestreos se realizaron en una montaña del Municipio Amecameca, cerca de la cascada de la "Burbuja" y en una Tabiquera a la entrada de Coatepec - Ixtapaluca, Estado de México. El muestreo del suelo se realizó de acuerdo con la metodología indicada en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Las muestras de suelo se obtuvieron con una pala recta, se seleccionaron submuestras y se guardaron en bolsas de polietileno para su traslado al Tecnológico de Estudios Superiores de Ixtapaluca. Posteriormente se prepararon muestras compuestas de cada punto y se homogeneizaron para cada tratamiento hasta obtener 1.5 kg que fueron almacenados en bolsas de plástico transparente y etiquetados con sus respectivos datos. Todas las muestras de suelo se secaron a temperatura ambiente (35 ^{o}C).

Determinaciones físicas y químicas. Las determinaciones físicas que se realizaron a cada una de las muestras de suelo fueron: Textura (hidrómetro de Bouyoucos) y método de Tarro, los valores de densidad real por el método del picnómetro, densidad aparente y capacidad de campo se determinaron por el método de la probeta (Klute, 1986, en: Domínguez-Soto, 2012). Las determinaciones químicas que se llevaron a cabo fueron los macro y micronutrientes, para ello se utilizó el kit de suelos La Motte STH-14. El pH se midió mediante un potenciómetro con electrodo de vidrio marca Oakton, Modelo 510.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los Cuadros 1 y 2 se muestran los resultados respecto a las propiedades físicas y químicas los cuales son los siguientes: referente a la textura del suelo en la prueba del Método de Tarro, predominaron las arcillas en ambas muestras, denominándose un suelo arcilloso, característico por ser muy permeables, con mala aireación, drenaje deficiente y compactarse cuando están secos (Armas-Castellanos, 2025).

En la prueba de Bouyocus predominaron las arenas, seguidas de los limos y arcillas, características de un suelo Franco arenoso para la muestra de Amecameca y un suelo Franco arcilloso arenoso para la Tabiquera. La cercanía a los suelos volcánicos, como es el caso de la muestra de Amecameca, hace que tenga más presencia de arenas, ya que las partículas más finas son transportadas por el viento a otras zonas más lejanas. Esta proximidad puede estar influyendo en la cantidad de humus presente en el suelo, el cual fue de 4%, así como de varios factores como textura, humedad, aireación, la cantidad de restos orgánicos, entre otros (Escamilla-Vitervo, 2024). Una propiedad de estos suelos es su densidad aparente, que se encuentra entre 1.45 y 1.60 g cm^3. Este valor es considerado moderado y es similar al resultado obtenido en Amecameca de 1.42 g·cm^3, coincidiendo con lo reportado por Flores-Márgez (2013) y a su vez contrasta con la muestra de la Tabiquera que mostró un valor de 0.95 g cm^3. Esta densidad moderada podría afectar

negativamente el suelo, ya que puede dificultar el movimiento del agua y reducir la porosidad del suelo, la cual se observa en la escasa retención de agua que posee, con un valor de 2% de capacidad de campo para la muestra de Amecameca y coincide con lo reportado en la Gaceta del Plan de Desarrollo Municipal de Amecameca (2025), la cual señala que el suelo de este municipio tiene una capacidad de retención de agua limitada. En cambio, la capacidad de campo de la muestra de la Tabiquera fue de 48%, este valor es considerado como moderado a alto y se atribuye a que presenta una textura como franco arcilloso arenoso, lo que favorece la retención de agua, de nutrientes y mejor aireación (Yahyaoui, 2017).

Estos hallazgos se ven reflejados en una mayor actividad microbiana del suelo proveniente de Amecameca con un promedio de 4. 44 mg C-CO_2 kg^{-1}suelo seco $día^{-1}$ en comparación con el suelo de la Tabiquera que obtuvo 2.06 mg C-CO_2 kg^{-1}suelo seco $día^{-1}$, por lo que este parámetro representa un bioindicador de la calidad del suelo.

Cuadro 1. Propiedades físicas de un suelo natural proveniente de Amecameca y un suelo contaminado por una Tabiquera.

	Método Tarro				Método Bouyocus					
Muestra	**A**	**L**	**R**	**Clase textural**	**A**	**L**	**R**	**Clase textural**	**Dap.**	**CC**
	%				%				($g \cdot cm^3$)	%
Suelo de Amecameca	4.1	15.9	79.6	Suelo Arcilloso	78	21	1	Arena Franco	1.42	2
Suelo Tabiquera	4.04	1	94.96	Suelo Arcilloso	70	6	24	Franco Arcilloso Arenoso	0.95	48

A= Arena; L= Limo; R= arcilla; Dap.= Densidad aparente; CC= Capacidad de Campo.

Cuadro 2. Propiedades químicas de un suelo natural proveniente de Amecameca y un suelo contaminado por una Tabiquera.

Muestra	**Hum.**	**pH**	**NO_3**	**Ca**	**Mg**	**SO_4**	**Fe**	**Al**	**NH_3**	**Cl**	**P**	**K**
	ppm										lb/acre	
Amecameca	4	6.6	20	1400	Muy bajo (5)	2000	5	Muy bajo (5)	Muy bajo (5)	500	75	120
Tabiquera	1	7.2	60	1400	Muy bajo (5)	2000	10	Muy bajo (5)	Muy bajo (5)	500	150	180

Hum.= Humus; NO_3= nitratos; Ca= calcio; Mg= magnesio; SO_4= sulfatos; Fe= hierro; Al= aluminio; NH_3= amoniaco; Cl= cloro; P= fosfóro; K= potasio.

Por otra parte la biomasa microbiana del suelo (Cmic) fue mayor en la muestra proveniente de Amecameca con un valor máximo de 43.94 mg Cmic 100 g^{-1} suelo seco a los 9 días (Cuadro 3), casí el doble con respecto a lo obtenido en el suelo contaminado por la Tabiquera y el control con 20.6 y 18.54 mg Cmic100 g^{-1} suelo seco respectivamente, indicando que la Cmic proporciona nutrientes que ayudan al crecimiento vegetal y regula funciones ecológicas importantes (Sparling, 198 In: das Chagas-Oliveira *et al.*, 2013).

Los niveles de Al obtenidos en el kit son "muy bajos" en ambas muestras, por lo que no representan un riesgo al estar poco soluble y no es tóxico para las plantas (Casierra y Cárdenas, 2007), aunque podría estar influyendo en la concentración de Mg la cual registró niveles bajos, lo que nos sugiere que su baja disponibilidad podría deberse a la lixiviación por las precipitaciones, afectando en el crecimiento radicular y la absorción de nutrientes (Espinoza *et al.*, s.f).

Además, la deficiencia de hierro presente puede provocar clorosis férrica y otros problemas en las plantas (Rivera *et al.*, 2008). Los niveles de nitratos se encuentran entre 20 y 60 ppm para Amecameca y la Tabiquera respectivamente, considerados como un nivel adecuado a alto para el desarrollo vegetal. Así mismo los valores para Ca (1,400 ppm) y Sulfatos (2,000 ppm) en ambas muestras presentaron un nivel alto con respecto a lo indicado en el manual de análisis de suelo La Motte, lo que sugiere que el suelo tiene presencia de rocas ricas en este mineral y una buena capacidad para aportar nutrientes a las plantas con respecto al Ca (Espinoza *et al.*, s.f) y los sulfatos podría generar toxicidad para algunos organismos del suelo, acidificando y disminuyendo la disponibilidad de nutrientes (Miao *et al.*, 2013).

De manera similar, los valores para Cl presentes en ambas muestras (500 ppm) pueden influir en la absorción de nitratos y ser tóxicos para las plantas (Sánchez-Tello, 2021). La presencia de Fosforo (P) en la muestra de la Tabiquera fue de 150 lb/acre y en Amecameca mostró valores de 75 lb/acre considerado bajo para una montaña, por lo que sería importante realizar prácticas para mejorar su disponibilidad ya que es esencial para el crecimiento de las plantas y ayuda a incrementar las concentraciones de hierro (Astudillo y Blair, 2008). Por otra parte, el K es un macro nutriente esencial, los resultados obtenidos en Amecameca fueron de 120 lb/acre y 18 lb/acre para la Tabiquera, se considera que son niveles de medio a bajos por lo que puede estar influido por el pH poco ácido que tiene la muestra de Amecameca, reduciendo su disponibilidad (Larriva, 2023) así como en la Tabiquera con suelos más alcalinos.

Cuadro 3. Actividad microbiana.

Actividad microbiana (Días/ mg C-CO2 kg^{-1}suelo seco $día^{-1}$)					**Biomasa microbiana (Días/mg Cmic 100 g^{-1}suelo seco)**					
5	**9**	**13**	**17**	**21**	**1**	**5**	**9**	**17**	**17**	**21**
4.2	4.2	5.4	6.36	3.84	21.97	42.573	43.947	36.393	14.42	13.047
1.8	2.06	1.1	2.62	3.88	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6

CONCLUSIONES

Los hallazgos de esta investigación demuestran una clara interconexión entre las características físicas y químicas del suelo y la salud de sus ecosistemas. La textura del suelo representa un factor crucial que repercute en la capacidad de retención de agua, en la aireación, drenaje, contenido de materia orgánica y en otras propiedades relacionadas con la fertilidad del suelo, siendo Amecameca la que mejores condiciones tiene. En conclusión, el análisis integral de estas propiedades es crucial para comprender la

dinámica del suelo, identificar su potencial de recuperación y fomentar prácticas de gestión que promuevan su funcionalidad ecológica a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

Armas-Castellanos, A. I. (2025). Análisis comparativo de propiedades físicas y químicas de suelos forestales y suelos agrícolas en la localidad Santa Catalina Tepanapa, Tochimilco, Puebla. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería Química. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 79 pp.

Astudillo, C. & Blair, M. (2008). Contenido de Hierro y Cinc en la semilla y su respuesta al nivel de fertilización con fósforo en 40 variedades de frijol colombiana. Agronomía Colombiana. Universidad Nacional de Colombia. Bogota, Colombia. 26(3): 471-476.

Büneman, E., Bongiorno, G., Bai, Z., Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T., Van Groenigen, J.W. y Brussard, L. (2018). Soil quality-A critical review. *Soil Biology and Biochemistry, 120*: 105-125.

Casierra P., F. & Cárdenas H. 2007. Influencia del aluminio sobre el crecimiento de la raíz en coliflor (Brassica oleracea L., var. Botrytis, Hib. 'Nevada F1'). *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica, 10*(1), 149-157.

Escamilla-Vitervo, L. (2024). Determinación de las propiedades hidrológicas del suelo en la reserva natural Flor del Bosque, Puebla. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla https://hdl.handle.net/20.500.12371/20584

Espinoza, L., Slaton, N. & Mozaffari, M. s.f. Como interpretar los resultados de Análisis de Suelos. Agricultura y Recursos Naturales. Division of Agriculture. Reserach & Extension. University of Arkansas System. 1-4. FSA2118SP-PD-1-12N

Flores-Márgez, J.P., Valero-Cordoba, C., Osuna-Ávila, P., Corral-Díaz, B., Sukla, M.K. & Salazar-Sosa, E. (2013). Textura de suelo y tipo de agua de riego en la disponibilidad de fósforo de estiércol bovino. Chapingo. *Terra Latinoam, 31*(3):211-220.

Gaceta Municipal de Amecameca, Plan de Desarrollo Municipal de Amecameca 2025-2027, número 17, vol. 1, 2025.

Klute, A. (1986). Methods of soil analysis. Part 1-Physical and mineralogical methods. American Society of Agronomy -Soil Science Society of America. Madison, WI. En: Domínguez-Soto, J. M., Román-Gutiérrez, A. D., Prieto-García, F., & Acevedo-Sandoval, O. (2012). Sistema de Notación Munsell y CIELab como herramienta para evaluación de color en suelos. *Revista mexicana de ciencias agrícolas 3*(1), 141-155.

Larriva, C. N. (2023). Sintesis de la importancia del Potasio en el suelo y plantas. Facultad de Ciencias pecuarias y agroindustrailes. *Lagranja, 2* (1): 2.

Medina-Savedra, T., Dzul-Cauich, J., Arroyo-Figueroa, G., García-Vieyra, I., Quiñones-Páramo, M. & Mexicano-Santoyo, l. (2021). Microorganismos de montaña y ensilado de maíz como probióticos en la engorda de conejos. *Abanico Veterinario. 11*(11): 401.

Mehna, P., Bhupinder, P. S, Kunnhikrishna, A. & Cowie, A.L. (2018). Soil Healt and Climate Changes: a crotical mexus. Managing soil health for sustainable. Burleigh dodds. *Science Publishin, 1*: 32.

Miao, B., Meixue, Z., Dongfa, S. & Chengdao, L. (2013). Molecular approaches unravel the mechanism of acid soil tolerance in plants. *The Crop Journal, 1*(2): 91-104.

Rivera, O.P., Etchevers, B.J., Hidalgo, M.C., Castro, M.B., de la Garza, R. F., Rodríguez, A. J. & Martínez, G.A. (2008). Fetirrigación ácida de hierro en cítricos establecidos en suelos calcáreps. *Terra Latinoam, 26*(2): 119-1125.

Sánchez-Tello, C.F. (2021). Caracterización fisicoquímica de los suelos agrícolas contaminados por Cadmio en el distrito de Leonor Ordoñez, provincia de Jauja, 2018. Tesis de Licenciatura. Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería. Huancayo. 117 pp.

Sparling, G.P. (1997). Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health. En: das Chagas-Oliveira, F., Calle-Collado, A., Carvalho-Leite, L. F. (2013). Autonomy ans sustainability: An integrated analysis of the development of new approaches to agrosystem management in family-bsed farming in Carnaubais Territory, Piauí, Brazil. *Agricultural Systems. Elsevier, 115*: 1-9.

Yahyaoui, I. (2017). Specification solf photovoltaic Pumping systems in Agriculture. Capter 1: Renewable Energies and Irrigation. *Elsevier*. 1-14. ISBN 9780128120392.

SUSTRATOS EN LA EMERGENCIA Y DESARROLLO DE ALHELÍ (*Matthiola incana* L.)

Ma. de Jesús Juárez Hernández[1]; Pedro Morgado Hernández[2]; Edna Fabiola Valdez[1] Hernández

[1] Departamento de Fitotecnia, [2] Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México. C. P. 56230. México.

Correo del autor de correspondencia: juarezhma@yahoo.com.mx

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de diferentes mezclas de sustratos sobre la emergencia y desarrollo de plántulas de alhelí (*Matthiola incana* L.). El diseño experimental fue un Completamente al Azar (DCA), los sustratos probados fueron: Peat moss, Agrolita, Vermiculita, Composta y Tierra de hoja. Se hicieron mezclas de dos sustratos diferentes, obteniendo nueve tratamientos con una proporción 50:50 y nueve tratamientos con una proporción 70:30 y cada uno con tres repeticiones. Con el paquete estadístico (SAS) se hizo un ANOVA y prueba de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$). La mejor mezcla de sustratos para la emergencia de plántulas de alhelí (*Matthiola incana* L.) fue Tierra de hoja-Agrolita en una proporción 70:30, superó en un 79.99% al tratamiento Peat moss-Agrolita (50:50) con el menor porcentaje. El tratamiento Composta-Vermiculita (50:50) obtuvo la mayor altura de planta que sobrepasó en un 112.12% tratamiento Peat moss-Agrolita (50:50); de la misma manera la longitud y ancho de hoja superaron en un 73.83% y en un 66.4% a los valores obtenidos en el tratamiento Peat moss-Agrolita (50:50). La mezcla Composta-Tierra de hoja proporción (50:50) produjo el mayor diámetro de tallo que excedió en un 62.22% tratamiento Peat moss-Agrolita (50:50) con el menor diámetro de tallo. Las plantas en la mezcla Peat moss-Composta proporción (70:30) tuvieron el mayor número de hojas y superaron en un 43.62% a las obtenidas en el tratamiento Peat moss-Vermiculita (70:30) que mostró el menor número de hojas.

PALABRAS CLAVE: *Agrolita; Composta; Peat moss; Tierra de hoja; Vermiculita*.

INTRODUCCIÓN

Las flores de alelí (*Mathiola incana*) con flores sencillas y de gran fragancia fue muy valorada como flor para fiestas de todos los santos (día de muertos). Actualmente se tienen nuevas variedades con varas que alcanzan un metro de longitud y que llevan espléndidas inflorescencias de 30-40 cm con flores dobles (Cano, 1994). Los floristas usan las nuevas variedades en el diseño floral, aunque la consideran una especie menor al compararla con la rosa, Lilium, tulipán. Un buen sustrato es esencial para la producción de plantas de alta calidad. El volumen de una maceta es limitado, el sustrato y sus componentes deben de poseer características físicas y químicas que, combinadas con un programa integral de manejo, permitan un crecimiento óptimo (Cabrera, 1995). En esta

investigación se estudió el efecto de diferentes mezclas de sustratos en la emergencia y desarrollo de plántulas de alelí (*Mathiola incana*).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se sembraron semillas de alhelí (*Mathiola incana*) de flor sencilla de color blanco y lila. Se estudiaron los sustratos: Peat moss, Agrolita, Vermiculita, Composta de gallinaza y Tierra de hoja (encino); se mezclaron dos sustratos diferentes en cada mezcla; nueve tratamientos con proporción 50:50 y nueve tratamientos con proporción 70:30, 18 tratamientos. Cada mezcla fue un tratamiento y cada tratamiento tuvo tres repeticiones, lo que resultó en 54 unidades experimentales.

Se evaluó la emergencia de la plántula y el desarrollo vegetativo: longitud de la plántula, número de hojas, diámetro de tallo, longitud y ancho de hoja se analizaron los resultados aplicando un ANOVA y prueba de medias (Tukey $\alpha \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Emergencia de plántulas de alhelí (*Matthiola incana* L.). Se observa en la Figura 1 que el mejor tratamiento fue Tierra de hoja-Agrolita proporción 70:30, superó estadísticamente (Tukey $\alpha \leq 0.05$) en un 79.99% al tratamiento Peat moss-Agrolita proporción 50:50 que produjo el menor porcentaje de emergencia. Sandhu *et al*. (1989), mencionan que la emergencia de las semillas depende de características fisiológicas y bioquímicas, además de diferentes condiciones ambientales; sin embargo, la semilla debe contener una reserva de energía que le ayudará en la germinación.

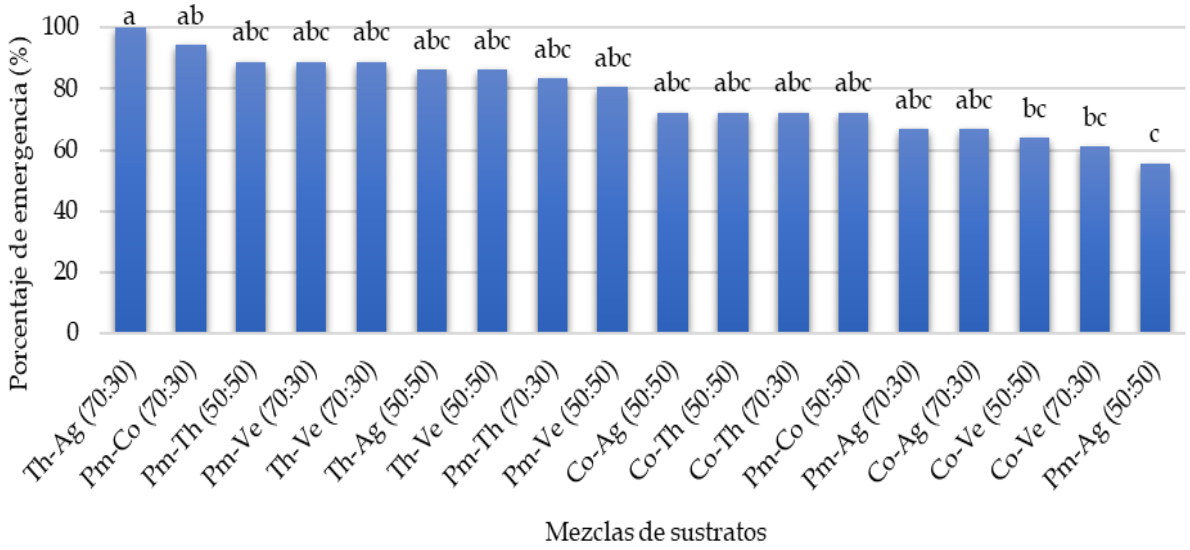
Los buenos resultados pueden deberse a que se combinaron las características físicas y propiedades químicas de ambos sustratos volviéndolos favorables para la emergencia de las plántulas. Cabañuelas (2014) menciona que en lo general la Tierra de hoja, ya sea de encino o pino, presenta una buena aireación, buen drenaje con una porosidad del 80%, y una elevada capacidad de retención de agua.

Por su parte, Alvarado y Solano (2002), mencionan que, para que la Agrolita tenga una buena capacidad de intercambio, es esencial mezclarla con Peat moss, Vermiculita, Corteza compostada o algo similar.

Altura de planta, longitud y ancho de hoja. Se observa en la Figura 2 que la mezcla de sustratos Composta-Vermiculita proporción 50:50 aportó buenos resultados para la altura de planta que sobrepasó estadísticamente (Tukey $\alpha \leq 0.05$) en un 112.12% al valor obtenido en el tratamiento Peat moss-Agrolita proporción 50:50; de la misma manera la longitud y ancho de hoja superaron en un 73.83% y en un 66.4%, respectivamente a los valores obtenidos en el tratamiento Peat moss-Agrolita proporción 50:50.

La mezcla de Composta-Vermiculita proporción 50:50 fue favorable debido a las características físicas y propiedades químicas de la Composta como son: incrementar la infiltración y capacidad de retención de agua, un pH 6-8, estas cualidades al combinarse con las características de la Vermiculita como son: alta capacidad de retención de humedad y pH neutral entre otras favoreció la mejor altura de planta, longitud y ancho de hoja. Cabrera (1999) y Bunt (1988) mencionan que las propiedades físicas de un sustrato como aireación, drenaje, retención de agua y densidad aparente, son

consideradas como las más importantes: si la textura física es inadecuada, difícilmente se podrá mejorar una vez que se ha establecido el cultivo. Urrestarazu (2003), menciona que las propiedades químicas de los sustratos caracterizan las transferencias de iones



entre el sustrato y la solución del sustrato.

Figura 2. Efecto de las mezclas de sustratos sobre el porcentaje de emergencia de plántulas de alhelí (*Matthiola incana* L.) cultivadas en diferentes mezclas de sustratos.

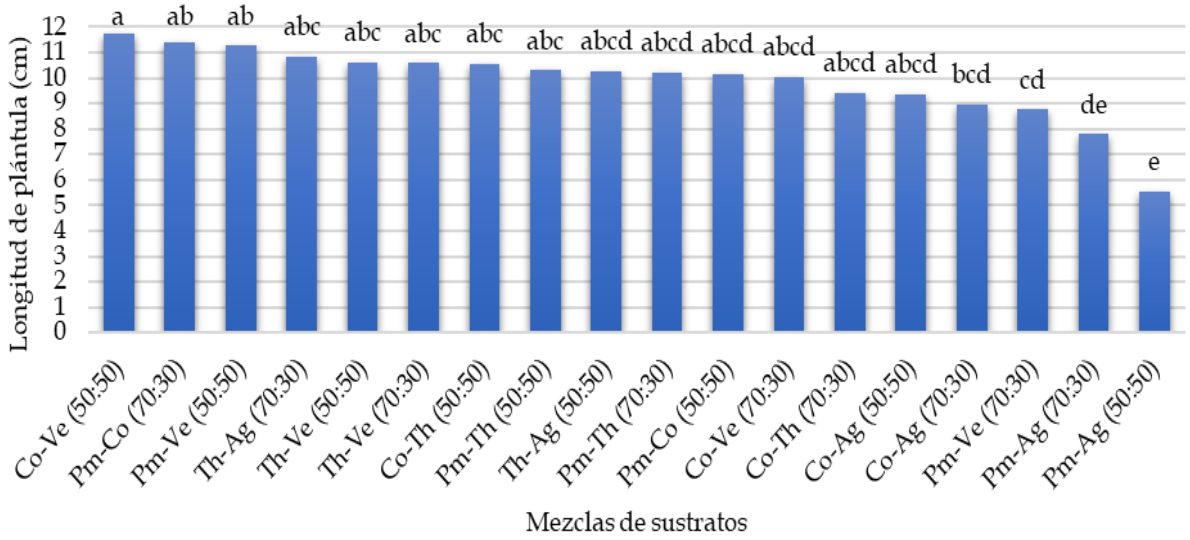


Figura 2. Efecto de las mezclas de sustratos sobre la altura de planta de alhelí (*Matthiola incana* L.) germinada en diferentes mezclas de sustratos.

Número de hojas. La Figura 3 muestra la mezcla de sustratos Peat moss- Composta proporción 70:30 aportó el mayor número de hojas de las plantas de alhelí, que superó estadísticamente (Tukey $\alpha \leq 0.05$) en un 43.62% al tratamiento Peat moss-Vermiculita proporción 70:30 que produjo el menor número de hojas. Verdonck (1998) menciona que

las aportaciones más interesantes de la composta son la mayor aireación y la reducción de la retención de agua al compararse con la turba. Además, se ha comprobado que tiene efectos supresores a través de los organismos antagonistas que se desarrollan en él.

Las altas temperaturas que se alcanzan durante el compostaje eliminan la mayor parte de las malas hierbas y otros microorganismos dañinos. La mezcla Composta-Tierra de hoja proporción (50:50) produjo el mayor diámetro de tallo que excedió en un 62.22% tratamiento Peat moss-Agrolita (50:50) con el menor diámetro de tallo.

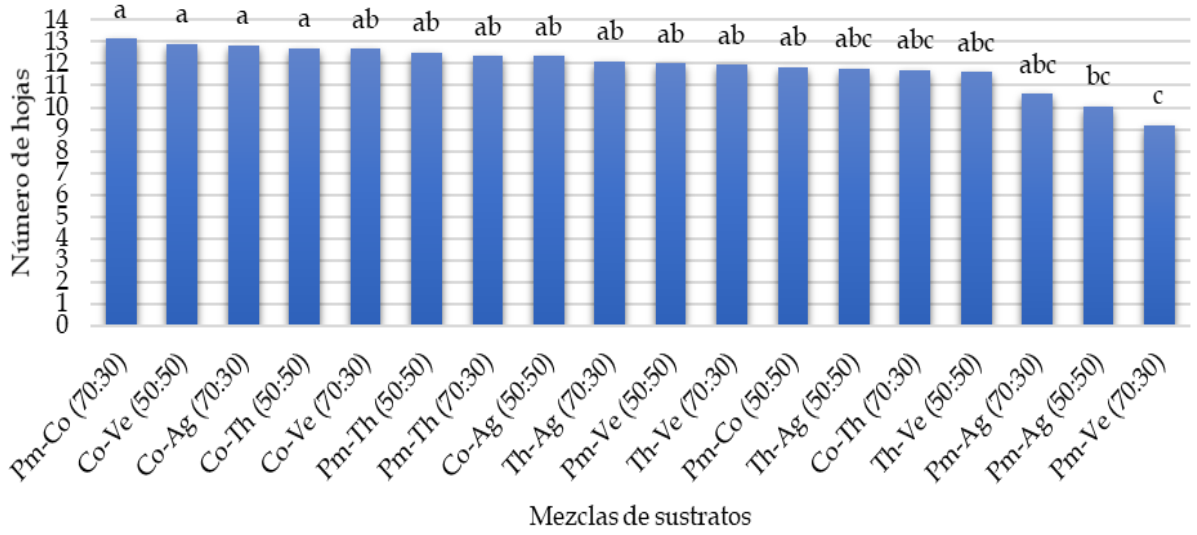


Figura 3. Efecto de las mezclas de sustratos sobre el número de hojas de planta de alhelí (*Mantthiola incana*) cultivada en diferentes mezclas de sustratos.

CONCLUSIONES

Las mezclas de sustratos que incluyeron Composta o bien Tierra de hoja presentaron los mejores resultados en las variables evaluadas. La mejor emergencia de plántulas de alhelí (*Matthiola incana* L.) fue en Tierra de hoja-Agrolita en una proporción 70:30, que superó en un 79.99% al tratamiento Peat moss-Agrolita (50:50).

La mezcla Composta-Vermiculita (50:50) aportó -la mayor altura de planta que sobrepasó en un 112.12% tratamiento Peat moss-Agrolita (50:50); de la misma manera la longitud y ancho de hoja superaron en un 73.83% y en un 66.4% al tratamiento Peat moss-Agrolita (50:50).

La mezcla Composta-Tierra de hoja proporción (50:50) produjeron el mayor diámetro de tallo que excedió en un 62.22% al tratamiento Peat moss-Agrolita (50:50). A su vez, las plantas en la mezcla Peat moss-Composta proporción (70:30) promovieron el mayor número de hojas y superaron en un 43.62% a las obtenidas en el tratamiento Peat moss-Vermiculita (70:30).

BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, M. A. & Solano, J. A. (2002). *Producción de sustratos para viveros.* Proyecto VIFINX. Costa Rica.

Bunt, A.C. (1988). *Media and mixes for container-grown plants.* Great Britain: Unwin Hyman Ltd.

Cabañuelas, L. H. (2014). Extracción ilegal de tierra de hoja, daño irremediable a la naturaleza. México: INFORURAL

Cabrera, R. I. (1995). Fundamentals of container media management, Part. 1. Physical properties. Rutgers Cooperative Extension Factsheet. No. 950.

Cabrera, R. I. (1999). Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivos para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, 5-11.

Cano, G. & Marroquín, J. S. (1994). *Taxonomía de las plantas superiores*. México: Trillas.

Urrestarazu, M. (2003). *Tratado de cultivo sin suelo.* Madrid. España: Mundi-Prensa.

Sandhu, S. S., Ma, T. A., Peng, Y. & Zhou, D. (1989). Clastogenicity evaluation of seven chemicals commonly found at hazardous industrial waste sites. *Mutation Research Genetic Toxicology*, 224(4), 437-445.

Verdonck, O. (1998). Compost specifications. *Acta Horticulturae*, 469, 169-178.

TIPOS DE USO DEL SUELO Y SU RESPIRACION EN ZONAS SEMIARIDAS

Alejandra Valles Rodríguez[1]; Juan Pedro Flores Margez[1]; Pedro Osuna Ávila[1]; Dolores Adilene García González[1]

[1] Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, UACJ, Av. Plutarco Elías Calles no. 1210, FOVISSSTE Chamizal, 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

Correo del autor para correspondencia: juflores@uacj.mx

RESUMEN

La respiración del suelo es un proceso clave del ciclo del carbono y depende de varios factores como la humedad, la temperatura y el contenido de materia orgánica. El objetivo del estudio fue evaluar la respiración del suelo y su relación con el contenido de materia orgánica en suelos cultivados y de monte de un ecosistema semiárido del norte de México. Se colectaron muestras de suelo a profundidad de 0 a 15 cm, cinco parcelas sembradas y cinco de monte contiguas no cultivadas. Se analizó pH, conductividad eléctrica, textura y materia orgánica, conforme a los métodos de la NOM-021-RECNAT-2000. La medición de C-CO_2 fue con la técnica basada en la medición de la conductividad eléctrica de las sustancias utilizadas en el sistema como el KOH y K_2CO_3, las muestras fueron incubadas durante cuatro días en cámaras selladas. Los resultados mostraron que los suelos agrícolas cultivados presentaron las tasas más altas de respiración, lo que sugiere una mayor actividad biológica posiblemente relacionada con el manejo del suelo y la incorporación de materia orgánica. En cambio, los suelos de monte mostraron tasas menores, reflejando una menor actividad microbiana. Correlaciones significativas se detectaron entre la respiración del suelo, el contenido de materia orgánica, la densidad aparente de los suelos tanto cultivados como aquellos sin someterse a labranza.

PALABRAS CLAVE: *Dióxido de carbono; Materia orgánica; Monte; pH; Salinidad.*

INTRODUCCIÓN

La respiración del suelo es un proceso fundamental en el ciclo global del carbono, ya que representa el flujo de dióxido de carbono (CO_2) que va desde el suelo y es liberado hacia la atmósfera, como resultado de la respiración microbiana, de la raíz, de la fauna edáfica y de procesos no biológicos (Yu *et al.*, 2021). Este flujo refleja la actividad biológica del suelo y su capacidad para descomponer la materia orgánica, convirtiéndola en un indicador clave de la salud y funcionalidad del ecosistema (Campuzano *et al*., 2021; Ryan y Law, 2005). Debido a que el suelo alberga una de las mayores reservas de carbono terrestre, las pequeñas variaciones en los flujos de respiración pueden tener efectos significativos a una escala global (Ryan y Law, 2005). La tasa de respiración del suelo está influenciada por factores ambientales tales como temperatura, humedad, pH, así como textura, cantidad y calidad de materia orgánica, disponibilidad de nutrientes y estructura del suelo (Blonska *et al*., 2021; Campuzano *et al*., 2021). En ecosistemas áridos, como el del

Desierto Chihuahuense, este proceso adquiere especial relevancia, ya que constituye una fracción dominante de la respiración total del ecosistema (Ayala-Niño *et al*., 2018). Su comportamiento se encuentra vinculado a las condiciones climáticas, como la temperatura del aire, la humedad del suelo y el déficit de presión de vapor (Campuzano *et al*., 2021). El nitrógeno también cumple un papel esencial en el funcionamiento de los ecosistemas, sobre todo en zonas áridas y semiáridas donde es uno de los nutrientes más limitantes (Zhang *et al*., 2008). A pesar de que el 79% de la atmósfera se encuentra compuesta de nitrógeno molecular (N_2), esta forma no es accesible para las plantas y debe ser transformada por microorganismos, y plantas fijadoras de nitrógeno (Celaya & Castellanos, 2011). Este proceso también depende de condiciones ambientales similares a las que afectan la respiración del suelo, como la temperatura, la humedad, el pH y la disponibilidad de materia orgánica. Así como con el CO_2, también se han desarrollado técnicas más precisas para el monitoreo del nitrógeno disponible tanto en los sistemas agrícolas como en los sistemas naturales (Bera *et al*., 2024). La interacción entre la respiración del suelo y la dinámica del nitrógeno refleja la relación entre el ciclo del carbono y el ciclo del nitrógeno, sobre todo en ambientes áridos, donde los pulsos breves de humedad activan rápidamente la actividad microbiana, la descomposición de materia orgánica y la liberación simultánea de CO_2. Así, comprender estos procesos sería de utilidad para conocer la salud del suelo, predecir cambios en la productividad del ecosistema y diseñar prácticas de manejo sustentables frente al cambio climático. El objetivo del presente estudio fue evaluar la respiración del suelo y su relación con el contenido de materia orgánica en suelos cultivados y sin cultivar de monte en un ecosistema árido del norte de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los sitios de estudio se localizaron en los ejidos Villa Luz y Samalayuca del municipio de Juárez, Chihuahua, a 31^0 21´ 10´´ N y 106^0 28´ 53´´ W. Las muestras de suelo fueron colectadas en suelos agrícolas y de monte contiguos para permitir la comparación del mismo tipo de suelo. Cinco de ellas se tomaron en áreas cultivadas y cinco en áreas no cultivadas. Se recolectaron a una profundidad de entre 0 y 15 cm, muestras compuestas de tres puntos de cada parcela. El suelo se secó, molió y tamizó a 2 mm para después analizar el pH, conductividad eléctrica, textura y materia orgánica, esto conforme a los lineamientos de la NOM-021-RECNAT-2000. La medición de CO_2 se realizó con la técnica propuesta por Battermann *et al*., 2022 del Cornell Soil Health Laboratory, basada en la medición de la conductividad eléctrica de las sustancias utilizadas en el sistema como el KOH y K_2CO_3 producidos en la reacción. Se pesaron 20 g de suelo, los cuales fueron humedecidos por capilaridad hasta llegar al punto de saturación de cada muestra. Después, el suelo fue colocado en una charola de aluminio de 4 cm de diámetro perforada, permitiendo el drenaje y la aireación. Esta charola se introdujo en un frasco de vidrio de 10 cm de altura por 5 cm de diámetro; se colocó un papel filtro en la base, encima la muestra de suelo, y sobre ésta un trípode de plástico que sostenía un vaso de precipitados con 9 mL de KOH 0.5 M. Finalmente, se incubó durante cuatro días, registrando la temperatura durante el periodo y al cuarto día de incubación se midió la

conductividad eléctrica del K_2CO_3 liberado en la reacción. El análisis de datos consistió en obtener los estadísticos descriptivos y comparación de promedios con la técnica Tukey al 0.05 mediante el programa SPSS versión 24.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con respecto a la descripción de algunas propiedades de los suelos estudiados, la textura de los suelos que predominó fue franco-arenosa, la alcalinidad varió de 7.28 a 7.68, mientras que la salinidad presentó una variación considerable, estuvo entre 3.5 y 23 dS m^{-1}, con valores menores a 5 dS m^{-1} en suelos sin cultivar, lo que es explicado por el riego con agua salina. La emisión de CO_2 como producto de la actividad microbiana en los suelos resultó diferente significativamente ($p < 0.05$) entre los sitios estudiados (Figura 1). En promedio, los sitios cultivados presentaron 26.8±0.074 mg C-CO_2 kg $día^{-1}$, mientras que los no cultivados de agostadero tuvieron 16.1±0.112 mg C-CO_2 kg $día^{-1}$, es decir, un incremento de 40% en liberación de CO_2. Este resultado puede explicarse por la mayor cantidad y actividad de los microorganismos en el suelo que se relaciona con la mineralización de materia orgánica medida como nitrógeno inorgánico liberado en el suelo y que es directamente absorbido por las raíces de las plantas (Flores *et al., 2010).* También el rango observado de C en el presente estudio coincide con la respiración del suelo cuantificada como C del CO_2 reportado en valores de 0.1 a 38.4 y 1.51 a 4.87 g C cm^2·día equivalente aproximadamente a 0.77 y 295 mg C kg $día^{-1}$ y 11.6 a 37.5 mg C kg $día^{-1}$para suelos agrícolas y de agostadero, respectivamente (Cuevas *et al*., 2016), mientras que Li *et al.* (2024) indican entre 1 a 6 µmol C-CO_2/m^2 s, es decir, 7.98 a 47.89 mg C-CO_2 kg $día^{-1}$.

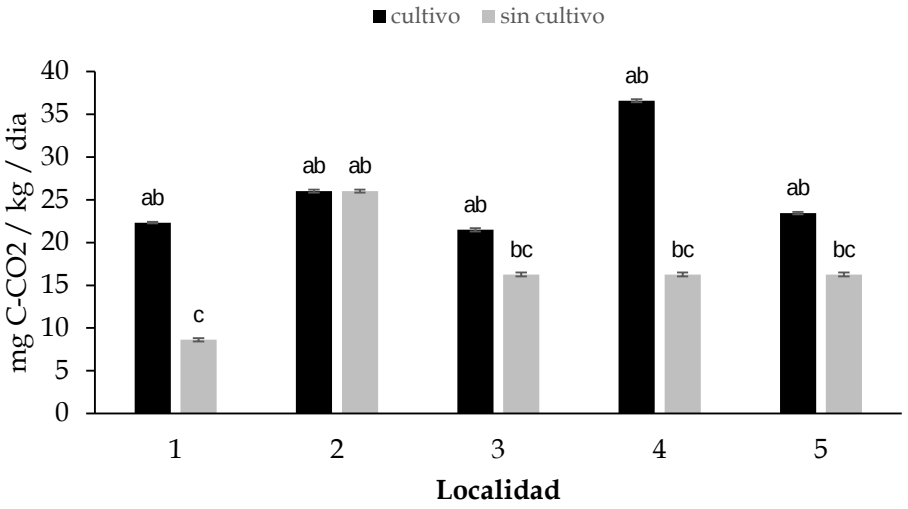


Figura 1. Respiración de suelo (C-CO_2) en áreas con cultivo y sin cultivo (de monte) en zonas semiáridas del norte en el Estado de Chihuahua.

Una correlación significativa ($p < 0.05$) se detectó entre la respiración del suelo y el contenido de materia orgánica de los suelos tanto cultivados como aquellos sin someterse a labranza o de agostadero en zonas áridas (Figura 2). La asociación de estas variables

mostró un efecto logarítmico con un coeficiente de determinación de 77.1%, lo que permite explicar que por cada unidad de incremento en el contenido de materia orgánica la emisión de C-CO_2 aumenta en 15.334 ln (% materia orgánica).

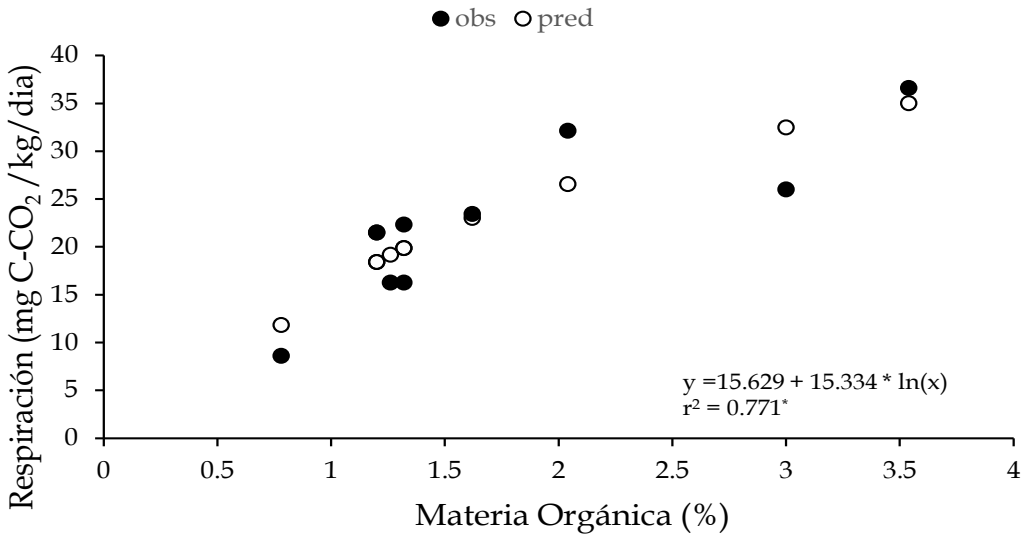


Figura 2. Respiración de suelo (C-CO_2) en función del contenido de materia orgánica en áreas con cultivo y sin cultivo.

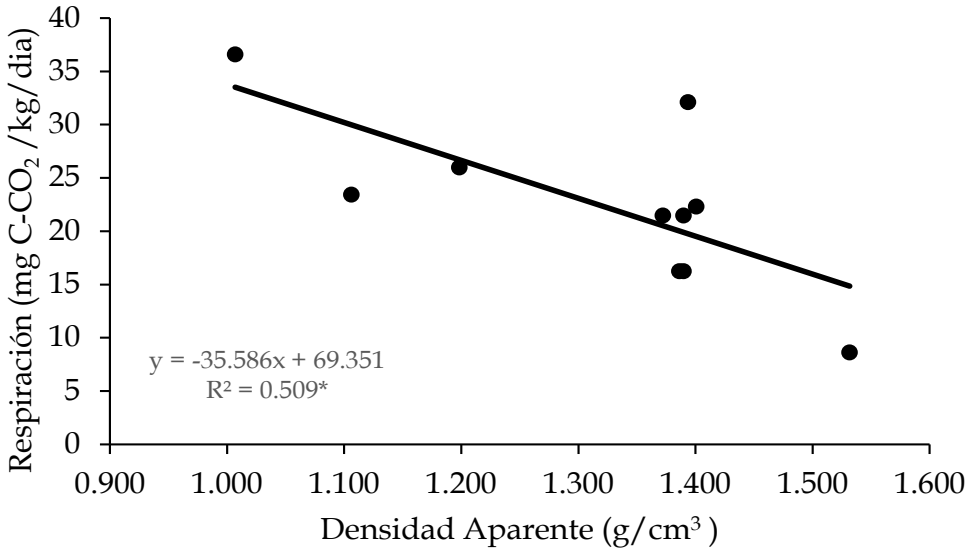


Figura 3. Respiración de suelo (C-CO_2) en función de la densidad aparente de los suelos en áreas con cultivo y sin cultivo.

Una correlación significativa ($p < 0.05$) se encontró entre la respiración del suelo y la densidad aparente de los suelos (Figura 3). Dado que la densidad aparente está estrechamente relacionada con la textura de los suelos (Brady y Weil, 2017), en este

resultado se aprecia que al aumentar la densidad ocurre una reducción lineal en la respiración del suelo en -35.586 mg C-CO_2 por cada unidad de disminución en la densidad aparente. Generalmente, al aumentar el contenido de arena se presenta un aumento en la densidad aparente, lo cual es de importancia en suelos de zonas áridas donde predominan estas clases texturales pesadas. Las tasas de respiración del suelo reportadas en múltiples estudios que fueron realizados en suelos áridos y semiáridos, donde ha existido una amplia variabilidad y reflejan las diferencias en condiciones ambientales, técnicas de medición y manejo del suelo. Gutiérrez *et al.* (2022) con una tasa de 24.2 mg C-CO_2 kg día^{-1} y Campuzano *et al.* (2025) con 12.5 mg C-CO_2 kg día^{-1} se ajustan a los resultados obtenidos en el presente estudio, lo cual podría reflejar condiciones similares de suelo o manejo de éste. La comparación de estas tasas muestra que a pesar de que la respiración del suelo en regiones áridas y semiáridas puede variar ampliamente, los valores típicos oscilan en el rango de 1 a 15 mg C-CO_2 kg día^{-1}. Esto otorga un marco de referencia para la interpretación de los resultados obtenidos en el presente estudio.

CONCLUSIONES

El presente estudio demostró que las tasas de respiración del suelo del norte del estado de Chihuahua difieren significativamente entre suelos cultivados y no cultivados (de monte). El incremento en la respiración del suelo en áreas cultivadas puede ser atribuido a una mayor actividad microbiana, la cual es estimulada a través de la fertilización, aportación de materiales orgánicos y mineralización de la materia orgánica.

Los valores observados en este estudio se encuentran dentro del rango reportado en la literatura para ecosistemas áridos y semiáridos, indicando que son consistentes con patrones regionales y globales de respiración de suelo. Se detectó la influencia significativa del uso agrícola en la dinámica de carbono del suelo en regiones áridas, con implicaciones muy importantes para el manejo sostenible de los recursos edáficos y la mitigación del cambio climático mediante el balance de carbono en este tipo de ecosistemas.

BIBLIOGRAFÍA

Ayala-Niño, F., Maya-Delgado, Y. & Troyo-Diéguez, E. (2018). Almacenamiento y flujo de carbono en suelos áridos como servicio ambiental: Un ejemplo en el noroeste de México. *Terra Latinoamericana*, *36*(2), 93. https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.334.

Batterman, Z., Kurtz, K., Moebius-Clune, D.J., & Schindelbeck, B. (2022). Respiration (Code: CSH 06, Rev. Final, pp. 1-16). Cornell Soil Health Laboratory.

Bera, S., et al. (2024). Advances in soil CO_2 measurement techniques. Environmental Monitoring and Assessment, 196(2), 147.

Blonska, E., et al. (2021). Influence of soil properties on respiration and microbial biomass. *Forest Ecology and Management,* 482, 118902.

Brady, N.C. & Weil, R.R. (2017) The nature and properties of soils. 15th ed., Prentice Hall. Upper Saddle River NJ USA 1086 p.

Campuzano-Granados, E. F., Delgado-Balbuena, J., & Flores-Rentería, D. (2021). Controlling factors of the ecosystem and soil respiration in a xeric shrubland in the Chihuahuan Desert, Mexico. *Geoderma Regional,* 25, e00406.

Campuzano, E. F., Guillén-Cruz, G., Juárez-Altamirano, R., & Flores-Rentería, D. (2025). Seasonal and land use effects on soil respiration and its controlling factors in arid lands from northeastern Mexico. *Soil Systems, 9*(1), 12.

Celaya, R., & Castellanos, J. Z. (2011). La dinámica del nitrógeno en suelos de zonas áridas. En: Suelos de zonas áridas: procesos, manejo y restauración. Colegio de Postgraduados.

Cuevas, A., C.A. Robles Z., J. Garatuza P., y E. A. Yepez (2016). Soil respiration in Mexico:Advances and future directions. *Terra Latinoamericana*, 34:253-269.

Flores, M.J.P., M. Z. Poncio A., E. Salas G., F. Pérez C., A.Y. Corral A., E. Salazar S. & Trejo, E. (2010).

Mineralización de nitrógeno en biosólidos estabilizados con cal. *Terra Latinoamericana*. 28(4):307-317.

Gutiérrez-Gutiérrez, M., Mendoza-Aguilar, D. O., Pando-Moreno, M. & González-Rodríguez, H. (2022). Influencia de las biocostras en el flujo de CO2 en el matorral desértico micrófilo del altiplano mexicano. *Terra Latinoamericana*, *40*. https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1211.

Li, Y., K. Zhang, Y. Li, P. Wan, et al. (2024). Temperature sensitivity of soil respiration to elevated temperature and nitrogen availability. *Soil & Tillage Research*, 244:106267. https://doi.org/10.3390/soilsystems9010012.

Ryan, M. G. & Law, B. E. (2005). Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. Biogeochemistry, 73, 3–27. https://doi.org/10.1007/s10533-004-5167-7

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2000). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000: Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis.* Diario Oficial de la Federación. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002#gsc.tab=0

Yu, H., Liu, X., Ma, Q., Yin, Z., Wang, Y., Xu, Z. & Zhou, G. (2021). Climatic warming enhances soil respiration resilience in an arid ecosystem. *The Science of the total environment*, *756*, 144005. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144005.

Zhang, L., Chen, Y., Li, W. & Zhao, R. (2008). Abiotic regulators of soil respiration in desert ecosystems. *Environmental Geology*, *57*(8), 1855-1864. https://doi.org/10.1007/s00254-008-1474-y.

El Suelo: Pasado, Presente y Futuro de la Vida

División III. Uso y Manejo del Suelo

RECUPERACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL SUELO EN UNA ZONA SEMIÁRIDA CON OBRAS DE CONSERVACIÓN EN PUEBLA

Rosalía Castelán Vega[1-2]; Ana Luisa Ramírez García[1]; J. Víctor Tamaríz Flores[1-2]; Abel Cruz Montalvo[2]; Lisett Santa Cruz Ludwig[2]

[1] Posgrado en Ciencias Ambientales, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.
[2] Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

Correo del autor de correspondencia: rosalia.castelan@correo.buap.mx

RESUMEN

La desertificación es un tipo de degradación propio de las regiones secas. Este fenómeno es el resultado de una serie de interrelaciones entre factores de origen climático y antropogénico. Debido a esta degradación, algunas instituciones de gobierno han aplicado medidas de conservación; sin embargo, no realizan el seguimiento de la recuperación de las propiedades del suelo. El presente trabajo tuvo como objetivo realizar la caracterización de las propiedades fisicoquímicas del suelo de una zona con obras de conservación en el municipio de Tepanco de López, Puebla, para establecer los patrones de recuperación de sus propiedades originales. Se extrajeron muestras compuestas a 30 cm de profundidad de material edáfico en áreas con obras de conservación (zanjas bordo, gaviones, muros de contención y reforestación) así como zonas sin protección. Posteriormente, las muestras se trasladaron al laboratorio, en donde se realizaron los análisis de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 de las siguientes propiedades: Materia orgánica (MO), pH, Textura; Densidad aparente (DA), Conductividad eléctrica (CE) y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC). Los resultados mostraron que los trabajos de conservación muestran una tendencia a la mejora de las propiedades fisicoquímicas del suelo; sin embargo, debido a las condiciones climatológicas de la región la susceptibilidad al proceso de desertificación es una constante, por lo que los suelos deben mantenerse cubiertos por vegetación, para que evitar la erosión eólica e hídrica. El suelo con muros de contención mejoró significativamente las variables edáficas, principalmente el incremento del porcentaje de materia orgánica y la disminución de la densidad aparente, en comparación con los suelos con otro tipo de medidas de conservación.

PALABRAS CLAVE: *Degradación; Mixteca; Muros de contención; Tepanco de López.*

INTRODUCCIÓN

El suelo es un material mineral no consolidado de la superficie terrestre que se ha desarrollado a través de procesos pedogéneticos complejos, alcanzando así distintas morfologías físicas, químicas y biológicas (Towhid, 2013). Por lo tanto, el suelo desempeña un papel crucial en el mantenimiento de los ecosistemas y de los sistemas climáticos de la Tierra, ya que cumple con funciones ecológicas tales como la

transformación de energía, reciclado de materiales orgánicos e inorgánicos, retención y purificación del agua, además de ser el principal recurso del cual las plantas y el ser humano dependen (Chen *et al*., 2002). No obstante, la degradación de este recurso ocurre cuando el potencial de productividad disminuye significativamente o cuando ya no es capaz de almacenar y reciclar agua, energía y nutrientes (Towhid, 2013). Dicha degradación engloba además procesos de erosión, agotamiento, contaminación y compactación, repercutiendo así en aspectos ambientales, económicos y sociales de las poblaciones involucradas en el entorno (Chen *et al*., 2002; García-Orozco, 2012).

Por ello, el presente trabajo tuvo como objetivo principal realizar, en primera instancia y como parte de una línea base de investigación, la caracterización de las propiedades fisicoquímicas del suelo de una zona con obras de conservación en el municipio de Tepanco de López, Puebla, para poder establecer los patrones de recuperación de las propiedades originales de este recurso. La vulnerabilidad de las zonas secas a este tipo de degradación se debe a la combinación de la fragilidad de los ecosistemas y factores climáticos y humanos, como la deforestación, el sobrepastoreo, el uso no sostenible de la tierra para la agricultura y el aumento de la variabilidad climática. Estas actividades degradan el suelo, reducen la cobertura vegetal y disminuyen la productividad, aumentando la susceptibilidad de estas áreas a convertirse en desiertos y amenazando la seguridad de sus poblaciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se ubica en el municipio de Tepanco de López, que se localiza al sureste del Estado de Puebla, entre los paralelos 18° 26′ y 18° 40′ de latitud norte; y los meridianos 97° 27′ y 97° 39′ de longitud oeste (Figura 1), entre 1700-2,600 msnm, con una superficie aproximada de 207 km²; los climas predominantes son: templado subhúmedo con lluvias en el verano; semiseco templado y semiseco semicálido. Para la caracterización fisicoquímica del recurso suelo, se realizó el reconocimiento de la zona de estudio, se establecieron cinco puntos de muestreo en áreas con obras de conservación (zanjas bordo, gaviones, muros de contención y reforestación) así como zonas sin protección con cinco repeticiones cada una, de los cuales se extrajeron muestras a 30 cm de profundidad de material edáfico de un kilogramo. Posteriormente, las muestras se trasladaron al laboratorio, donde se realizaron los análisis de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana

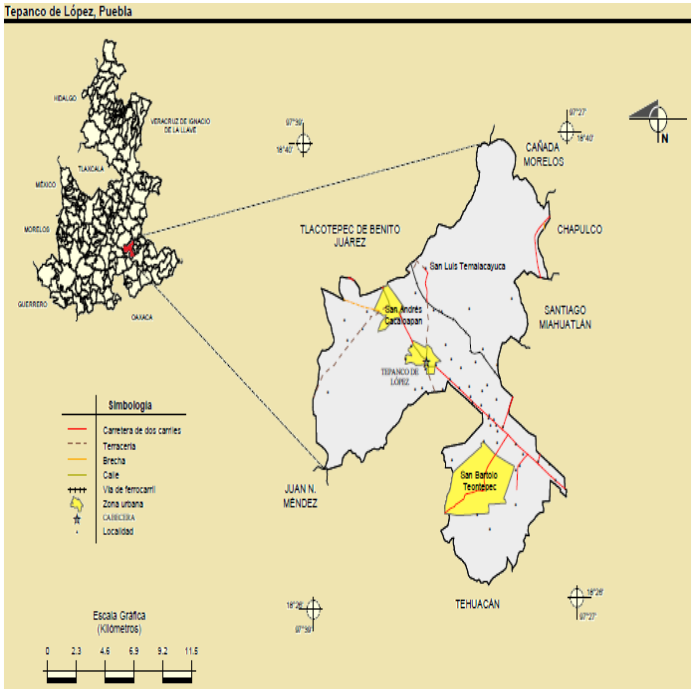


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

NOM-021-SEMARNAT-2000. Las principales variables que se evaluaron fueron: porcentaje de materia orgánica (MO), pH, textura, densidad aparente (DA), conductividad eléctrica (CE) y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Se aplicó un análisis de varianza de una vía con un nivel de significancia de 0.05 para determinar la presencia de diferencias estadísticamente significativas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la caracterización fisicoquímica de las muestras que se extrajeron evidencian que, los suelos de esta región son ligeramente salinos, debido principalmente a que el material de origen son rocas calizas (Ki (cz)) (INEGI, 1999). Por otra parte, los bajos valores de densidad aparente se deben a que la capa superficial de estos suelos presenta principalmente texturas del tipo franco, así como alto porcentaje de materia orgánica, que a su vez explica la alta capacidad de intercambio catiónico (Oyarzún, 2011) (Cuadro 1). Por otra parte, al comparar, mediante un Análisis de Varianza de una vía (ANOVA) con un nivel de significancia de 0.05, las áreas donde se presenta algún tipo de obra de conservación (AP1, AP2, AP3) con respecto a aquella que no tiene (ASP), se denota tentativamente que las propiedades fisicoquímicas no difieren significativamente para cada zona (Cuadro 2).

Por lo que no ha habido una recuperación significativa del recurso suelo durante los cuatro años que tienen de construidas las obras de conservación (2012-2016); sin embargo, los porcentajes de materia orgánica son superiores en los suelos con muro de contención, seguido de los que cuentan con gavión, zanja bordo y reforestación, teniendo el valor más bajo el suelo sin protección, con 6.96% de materia orgánica. Es indispensable continuar con el monitoreo para determinar el tiempo de recuperación de las propiedades del suelo.

Cuadro 1. Variables fisicoquímicas evaluadas en base a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Obra de Conservación	Clave	Textura	DA (g cm^3)	pH	CE (dS m^{-1})	CIC (Cmol (+Kg^{-1}))	% MO
Zanja Bordo y Reforestación	AP1	Franco arcillosa-Franco arcillo arenosa	1.019 ±0.091	7.135 ±0.106	1.850 ±0.904	31.80 ±6.79	6.964 ±1.358
Muro de Contención	AP2	Franco-Franco arenosa	0.818 ±0.006	7.505 ±0.375	1.830 ±0.689	29.50 ±2.69	10.566 ±0.679
Gavión	AP3	Franco-Franco arcillo limosa	0.954 ±0.004	7.990 ±0.325	1.597 ±0.240	33.40 ±7.07	9.605 ±0.340
Sin Protección	ASP	Franco arenosa	0.933 ±0.109	7.770 ±0.764	1.688 ±0.433	41.70 ±2.69	6.96 ±2.04

DA= Densidad aparente; CE = Conductividad Eléctrica; CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico; MO= Materia orgánica.

Cuadro 2. ANOVA de las variables fisicoquímicas evaluadas.

	DA ($g\ cm^3$)	pH	CE (d S/m)	CIC Cmol (+) Kg^{-1}	MO (%)
ANOVA*	0.177	0.393	0.97	0.25	0.102

* Nivel de significancia $\alpha = 0.05$

CONCLUSIONES

La caracterización ambiental de una región es la base fundamental tanto para el estudio como para la detección temprana de los procesos de degradación, ya que permite conocer las condiciones actuales y reales en las que se encuentran los recursos, en especial el suelo, para así establecer las pautas de conservación y recuperación necesarias. En el caso de Tepanco de López, los trabajos de conservación del recurso suelo, en apariencia mantienen y mejoran las propiedades fisicoquímicas del suelo, principalmente la acumulación de materia orgánica y la disminución de la densidad aparente; la obra de conservación que presenta mayor beneficio para este ecosistema son los muros de contención. Es indispensable continuar con el monitoreo, con la finalidad de determinar los tiempos de recuperación de estos suelos bajo las condiciones semiáridas de este ecosistema.

BIBLIOGRAFÍA

Chen, J., Chen, J.Z., Tan, M.Z. & Gong Z.T. (2002). Soil degradation: a global problem endangering sustainable development. *Journal of Geographical Sciences*, 12 (2), 243-252.

García-Orozco, J.A. (2012). Procesos de cambio en el uso del suelo de una microcuenca en el altiplano mexicano. El caso del Río San José en el Estado de México. *Papeles de Geografía*, 55, 63-73.

INEGI, (1999). Síntesis geográfica del Estado de Puebla. Anexo cartográfico.

Oyarzún, E.C. (2011). Propiedades hidrológicas del suelo y exportación de sedimentos en dos microcuencas de la Cordillera de la Costa en el sur de Chile con diferente cobertura vegetal. *BOSQUE*, 32(1), 10-19.

SEMARNAT & CONANP. (2013). Programa de Manejo Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán. Visto en: http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/tehuacan_2013.pdf

Towhid, O.K. (2013). Soil. Principles, properties and management. New York. Springer Science+Business Media Dordrecht.

FERTILIDAD QUÍMICA COMPARACIÓN ENTRE MANEJO ORGÁNICO Y CONVENCIONAL EN EL CULTIVO DE MANZANILLA

Daniel Torres Nava[1]; Gerardo Cruz Flores[2]

[1]Universidad Intercultural del Estado de México Plantel Tepetlixpa, área Desarrollo Sustentable Tepetlixpa Estado de México.
[2] Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México, FESZ UNAM. Av. Guelatao 66, Ejército de Oriente Indeco II ISSSTE, Iztapalapa, 09230 Ciudad de México, CDMX.

Correo del autor de correspondencia: dtorres.nava@gmail.com

RESUMEN

El manejo de la fertilidad del suelo es una práctica cultural importante y costosa para los productores "orgánicos", quienes tienen restringido el uso de fertilizantes sintéticos, lo que puede ser una limitante para la producción de estos sistemas. Una herramienta que atenúa la limitante señalada es el monitoreo de su fertilidad. Este estudio se realizó en Juchitepec, Estado de México, con el grupo de productores orgánicos "Buenos Manzanilleros" con el objetivo de comparar la fertilidad del suelo entre un sistema de manejo orgánico v.s. convencional, en el cultivo de manzanilla. Se recolectaron muestras de suelo para analizar propiedades químicas como pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio. Los resultados muestran bajos niveles de materia orgánica ya que están por debajo del 4%, los datos de nitrógeno y potasio no presentaron diferencias significativas en ambos sistemas. Por otro lado, el fósforo disponible del manejo convencional supera un 400% al manejo orgánico, probablemente debido al suministro continuo de fertilizantes que se van reteniendo por la capacidad de fijación de fósforo que tienen los andosoles. Los valores de pH del suelo fueron bajos en ambos sistemas y la conductividad eléctrica fue mayor en el suelo del sistema orgánico. El monitoreo del suelo es fundamental para mantener la fertilidad del suelo y reducir la ocurrencia de deficiencias nutricionales. Asimismo, el uso de enmiendas orgánicas permite un manejo sustentable en la producción de plantas medicinales como la manzanilla.

PALABRAS CLAVE: *Andosol; enmiendas orgánicas.*

INTRODUCCIÓN

Las plantas Medicinales y Aromáticas, han tenido una tendencia en su consumo y es probable que esta tendencia continúe a largo plazo, lo que ha ocasionado una sobreexplotación y cambios las prácticas agrícolas (Misra, 2009). Una estrategia para evitar ese impacto en los recursos naturales, es una agricultura orgánica, donde se pondera el uso de abonos orgánicos, el manejo de la fertilidad del suelo debe operar en consonancia con los ciclos naturales de los nutrientes. Un óptimo manejo de sistema de agricultura orgánica, requiere información sobre las características e impactos ambientales asociadas a las prácticas agrícolas, de ahí la necesidad de monitorear la

fertilidad del suelo. Un estudio previo ha demostrado que la mitad de los agricultores interesados en implementar una "agricultura orgánica" han mencionado que el nitrógeno (N) es el nutriente limitante para obtener altos rendimientos (Gaskell y Smith, 2007). En el caso del fósforo (P), se ha observado su disminución significativa con respecto a un sistema convencional (Cornish, 2009). Un suministro óptimo de potasio (K) es esencial tanto para la producción de cultivos orgánicos como convencionales. Al respecto, en Estados Unidos y Canadá, se ha reportado un mayor nivel de extracción de K durante la cosecha con respecto a lo aportado mediante fertilizantes sintéticos (Mikkelsen, 2007). Por lo tanto, es importante el monitoreo de la fertilidad del suelo, para minimizar problemas ambientales y mantener una gestión optima de las prácticas agrícolas como la fertilización. El objetivo de este trabajo fue evaluar el manejo de la fertilidad orgánico en comparación con un manejo convencional, en el cultivo de manzanilla.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio. El trabajo se llevó a cabo en el municipio de Juchitepec, Estado de México (19° 05 ’de latitud norte y 98°52’ longitud oeste); la altura promedio oscila entre 2,300 y 3,100 m. El clima en el municipio es templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (85.28%) y semifrío subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (INEGI,2009). Los campos de manejo orgánico y convencional son del grupo de productores orgánicos “Buenos Manzanilleros”.

Análisis de suelo. Se colectaron ocho muestras por cada sistema a la profundidad de 30 cm y elaboraron muestras compuestas, las cuales fueron transportadas al laboratorio de fertilidad de suelos en el Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo, Estados de México. Se determinó la textura, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica (dS m^{-1}), materia orgánica (%), nitrógeno total (%), fósforo disponible (mg kg^{-1}) de acuerdo con en los métodos establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). El análisis de las variables cuantitativas presentadas se llevó a cabo mediante técnicas de estadística descriptiva y ANOVA.

Cuadro 1. Características generales de los sistemas de manejo orgánico y convencional para el cultivo de manzanilla en Juchitepec estado de México**.**

Practica agrícola	**Sistema agrícola**	
	Sistema orgánico	**Sistema convencional**
Fertilización	Abonos orgánicos	Fertilizantes de síntesis química
Dosis	2 T	70-50-0
Fuentes	estiércol de vacuno	Fosfonitrato, DAP
Uso de abonos orgánicos	Si	No
Rendimiento	2	2.5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

No se observaron diferencias significativas en cuanto al contenido de materia orgánica entre sistemas de producción, esto puede deberse a las proporciones y características de las enmiendas orgánicas (Gosling y Shepherd, 2005). Marinari *et al.,* (2006) estimaron un

incremento en la MO del suelo después de un período mayor a 7 años de manejo orgánico. De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 ambos sistemas presentan niveles bajos de materia orgánica, pues en ella se establece que suelos volcánicos tienen bajo contenido de materia orgánica si la presentan por debajo de 4%. En la agricultura, la materia orgánica juega un papel especial por lo que se deben priorizar acciones para incrementarla o al menos reducir su pérdida.

El pH del suelo para ambos sistemas presentó niveles bajos, otros estudios en sistemas orgánicos muestra un pH bajo mostrando valores de 5.7 en parcelas manejadas por un periodo de 3 años tal como se realizó en esta investigación (Haraldsen *et al.,* 2000). Para el cultivo de manzanilla, tal parece no afectarle este valor de pH, pues se han establecido experimentos con valores de 6 en suelos arenosos (Andrzejewska y Woropaj-Janczak, 2014). La CE fue más alta en suelos con manejo orgánico, lo cual deberse a que cuando se descomponen desechos ricos en nutrientes o animales, aumentan la cantidad de sales y iones en el suelo en su fase líquida. Estos cambios influyen en la CE del suelo (Peralta, y Costa, 2013).

De acuerdo con los datos obtenido del (Cuadro 1) Ambos sistemas no presentaron diferencias significativas en el contenido de nitrógeno total. En general se ha observado que los suelos manejados orgánicamente se caracterizan por tener reservas reducidas de N-mineral, que en combinación con mayores actividades microbianas aumentan la disponibilidad de N (Fess y Benedito, 2018). El suministro de nitrógeno por parte del sistema orgánico depende de la mineralización de la materia orgánico y al no haber alguna otra fuente, la importancia de la mineralización en el suministro de nutrientes a las plantas aumenta considerablemente (Stockdalfese, *et al.,* 2002).

El sistema orgánico presentó bajos niveles disponibles de este elemento comparados con el convencional. Si se continua con esta tendencia, es probable que se lleguen a presentar algunas deficiencias en suelos con manejo orgánico, como se ha registrado a nivel mundial donde se han encontrado valores menores a 6 $mg.kg^{-1}$ (Evans y Price, 2009). Sin embargo, si no llegara a reponerse este elemento, se provocarían un déficit que afectará significativamente las cosechas a largo plazo (Ohm *et al*., 2017). Los suelos con manejo convencional presentaron altos niveles de fósforo, esto puede deberse a que año con año, se aplican fuentes químicas de fósforo y debido a que son suelos andosoles, estos se caracterizan por tener grandes cantidades de alófanos que son minerales amorfos que tienen la propiedad de fijar el fósforo (Alcala *et al.,* 2009). Se estima que 80% del P aplicado a través de la fertilización se fija rápidamente en formas estables en el suelo que no disponibles para las plantas (Pradhan *et al.,* 2017).

Para el caso del potasio no se presentaron diferencias significativas entre sistemas de producción, sin embargo, ambos sistemas presentaron bajos niveles de este elemento, pues se considera que hay niveles críticos cuando el K^+ es menor a 110 mg kg^{-1}. (Berry *et al.,* 2003) y esto se debe atribuir a que ningún sistema utiliza alguna fuente que suministre potasio. Se ha demostrado que en campos orgánicos las concentraciones de K en el suelo disminuyen año con año, porque los cultivos cosechados extraen las reservas de K que se acumulan durante los años anteriores cuando los campos tenían un manejo convencional. (Gosling y Shepherd, 2005).

Cuadro 1. Medias de las propiedades edafológicas de dos sistemas de producción en el cultivo de manzanilla Cuijingo, Estado de México.

	N-total	P-disponible	K-int.	MO	pH	CE
Sistema	%	**mg kg^{-1}**	**mg kg^{-1}**	%		
Convencional	0.11 a	46.5 a	1.48 a	2.25 a	5.20 a	0.35a
Orgánico	0.11 a	9.03 b	0.86 a	3.04 a	5.72 b	1.45b

N-total=Nitrógeno total; P-disponible= fosforo disponible; K-int.= Potasio intercambiable; MO= materia orgánica (%); pH (1:2); CE= Conductividad Eléctrica (dS m^{-1}). Diferentes letras significan diferencias significativas 0.05.

CONCLUSIONES

El análisis de los diferentes parámetros físicos y químicos del suelo evaluados en sistemas de manejo orgánico y convencional revela que, en general, no se encontraron diferencias significativas en el contenido de nitrógeno y potasio, lo cual puede estar relacionado con la naturaleza de las enmiendas orgánicas aplicadas y la duración del manejo. Ambos sistemas mostraron niveles bajos de materia orgánica menor al 4%, lo que indica la necesidad de implementar estrategias para su conservación y aumento, dado su papel clave en la fertilidad y salud del suelo. Respecto al fósforo, se observó una diferencia significativa, con mayores concentraciones en el sistema convencional, probablemente debido a la aplicación continua de fertilizantes fosfatados y a la capacidad de fijación de fósforo de los suelos andosoles. Esta situación alerta sobre una posible deficiencia de fósforo en sistemas orgánicos a largo plazo si no se aplican medidas correctivas adecuadas.

BIBLIOGRAFIA

Andrzejewska, J. & Woropaj-Janczak, M. (2014). German chamomile performance after stubble catch crops and response to nitrogen fertilization. *Industrial Crops and Products*. 62, 350-358.

Alcalá de Jesús M., Hidalgo-Moreno C. & Gutiérrez-Castoreña, M. (2009). Mineralogía y retención de fosfatos en Andisoles. *Terra Latinoamericana,* 27(4), 275-286.

Berry, P.M., Stockdale, E.A., Sylvester-Bradley, R., Philipps, L., Smith, K.A., Lord, E. I. & Fortune, S. (2003). N, P and K budgets for crop rotations on nine organic farms in the UK. *Soil use and management,* 19(2), 112-118.

Cornish, P.S. (2009). Phosphorus management on extensive organic and low-input farms. *Crop and Pasture Science,* 60(2), 105-115.

Evans, J., Price, A. (2009). Influence of rates of reactive phosphate rock and sulphur on potentially available phosphorous in organically managed soils in the south-eastern near-Mediterranean cropping region of Australia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems,* 84, 105-118.

Fess, T.L. & Benedito, V.A. (2018). Organic versus conventional cropping sustainability: a comparative system analysis. *Sustainability*. 10(1), 272.

Gaskell, M. & Smith, R. (2007). Nitrogen sources for organic vegetable crops. Hort Technology. 17(4), 431-441.

Gosling, P. & Shepherd, M. (2005). Long-term changes in soil fertility in organic arable farming systems in England, with particular reference to phosphorus and potassium. *Agricultere Ecosystem Environment,* 105:425–432. doi:10.1016/j. agee.2004.03.007.

Haraldsen, T.K., Asdal, Å., Grasdalen, C., Nesheim, L., Ugland, T.N. (2000). Nutrient balances and yields during conversion from conventional to organic cropping systems on silt loam and clay soils in Norway. *Biological agriculture & horticulture*, 17(3), 229-246.

Instituto Nacional de Estadística y Geogr6afía. (2010). Marco geoestadístico municipal 2010.

Marinari, S., Mancinelli, R., Campiglia, E. & Grego, S. (2006). Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecological Indicators*, 6(4), 701-711.

Mikkelsen, R.L. (2007). Managing potassium for organic crop production. *HortTechnology,* 17(4), 455-460.

Misra, A. (2009). Studies on biochemical and physiological aspects in relation to phyto-medicinal qualities and efficacy of the active ingredients during the handling, cultivation and harvesting of the medicinal plants. *Journal Medicinal Plants Res*., 3 (13), 1140-1146.

Ohm, M., Paulsen, H. M., Moos, J. H. & Eichler-Löbermann, B. (2017). Long-term negative phosphorus budgets in organic crop rotations deplete plant-available phosphorus from soil. *Agronomy for Sustainable Development,* 37, 1-9.

Peralta, N.R. & Costa, J.L. (2013). Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Computers and electronics in agriculture,* 99, 218-226.

Pradhan, A., Pahari, A., Mohapatra, S.& Mishra, B.B. (2018). Phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture: genetic mechanism and application. In Advances in soil microbiology: Recent trends and future prospects: Volume 2: Soil-Microbe-Plant Interaction. Singapore: Springer Singapore. 81-97.

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. NOM-021-RECNAT-2000: especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial (segunda sección), MEX.

Stockdale, E.A., Shepherd, M.A., Fortune, S. & Cuttle, S P. (2002). Soil fertility in organic farming systems–fundamentally different?. *Soil use and management,* 18, 301-308.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS SUELOS AGRÍCOLAS DEL COLEGIO DE POSTGRADUADOS CAMPUS MONTECILLO

Nicolás Martínez Maroto[1]; Ismael Rivera Ramírez[2]; Mariana Tovar Castañón[1]; Mitzi del Rosario Lupián Machuca[1]; Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena[1]; Carlos Alberto Ortiz Solorio[1]

[1] Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco km. 36.5 56230, Texcoco, Estado de México, México.
[2] Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1ª Sección 09310, Alcaldía Iztapalapa, Ciudad de México, México.

Correo del autor de correspondencia: martinez.nicolas@colpos.mx

RESUMEN

La calidad de los suelos agrícolas es fundamental para garantizar su productividad sostenible. Este estudio evaluó las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos de uso agrícola del campus Montecillo, México, identificando factores limitantes. Se analizaron cuatro series mediante perfiles de suelo y se realizó un muestreo sistemático de la capa superficial para determinar sus propiedades edáficas. La metodología incluyó la Evaluación Visual del Suelo (EVS), índices de calidad de suelos (ICS), composición florística de arvenses como bioindicadores de degradación y propuestas de enmiendas orgánicas. Los resultados indican que los suelos se categorizan de moderado a muy mala aptitud para el desarrollo agrícola. Los factores limitantes principales fueron el bajo contenido de materia orgánica (MO), densidad aparente (Da) elevada, pH alcalino y degradación estructural por labranza continua, teniendo relación con la predominancia de arvenses introducidas. Se concluye que la rehabilitación de estos suelos requiere la aplicación específica de enmiendas orgánicas, como vermicompost, para incrementar la MO y mejorar la calidad del suelo a largo plazo.

PALABRAS CLAVE: *Aptitud; arvenses, calidad de suelo; enmiendas orgánicas; materia orgánica.*

INTRODUCCIÓN

La calidad del suelo agrícola se entiende como la capacidad del suelo para sostener funciones clave y mantener la productividad, la cual puede verse alterada por prácticas de manejo como la labranza, el riego o la fertilización (Bünemann *et al*., 2018; Bautista *et al*., 2004; Karlen *et al*., 1997). La evaluación mediante índices de calidad permite valorar propiedades y ajustar el manejo agrícola (Santos-Francés *et al*., 2019; de la Cruz y Fontalvo, 2019; Escobar-Perea, 2017; García *et al*., 2012), mientras que las arvenses pueden funcionar como bioindicadores de pH, textura, fertilidad y capacidad de retención de agua (Vibrans, 2021). Con este marco, el objetivo de este trabajo fue evaluar a los suelos agrícolas del Colegio de Postgraduados campus Montecillo con la finalidad de identificar cuáles son las propiedades físicas o químicas que limitan la producción de los suelos

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el predio del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, Texcoco, Estado de México (19°27′30″–19°28′10″ N; 98°53′40″–98°55′30″ O); 2,210 msnm), sobre depósitos piroclásticos cuaternarios y materiales lacustres del Ex-Lago de Texcoco (Siebe *et al*., 1996), cuerpo salobre que integró un gran sistema lacustre junto con los lagos Xochimilco, Chalco y Zumpango (Toole, 2019; Carranza-Edwards, 2018).

Con base en González *et al*. (2012), se eligieron sitios representativos por serie; excavándose un perfil de hasta 1.5 m y describiéndose conforme al manual de Gutiérrez-Castorena (2025). Para laboratorio, se realizó un muestreo sistemático de 35 puntos (cada 200 m) y se determinaron pH (2:1), conductividad eléctrica (dS m^{-1}), densidad aparente (g cm^{-3}) y materia orgánica (%) por Walkley-Black (Van Reeuwijk, 1999).

La evaluación consideró: i) la EVS de Shepherd (2000) con indicadores físicos y biológicos de los perfiles; ii) el ICS con indicadores de laboratorio (Nuñez-Peñaloza *et al*., 2023), iii) la identificación taxonómica de arvenses (Rzedowski y Calderón, 2005) y un Análisis Multivariado de Coordenadas Principales (PCoA) en PAST5 para explorar similitud entre series según su composición florística; y iv) el diseño de enmiendas para elevar la MO a 3.5% mediante la masa de suelo y conversión Materia Orgánica (MO) ↔ Carbono Orgánico (CO) (FAO, 2019; FAO, 2020; Pribyl, 2010), contemplando el estiércol bovino composteado (Ec) y sin compostear (E), compost de pasto (C) y vermicompost (V). Para ello, se tomó en cuenta sus características, contenido de materia orgánica y eficiencia de incorporación (Trinidad-Santos y Velasco-Velasco, 2016; Félix-Herrán *et al*., 2010) en un plazo de 10 años.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con González *et al*. (2012), las series con actividades agrícolas corresponden a Canal, Corrales, Duraznos y Estación. La EVS evidenció que todas las series presentan limitantes muy marcados. En Estación la EVS fue mala, su textura franca arenosa y arenosa favorece su infiltración, pero su limitado desarrollo y la baja estabilidad de sus agregados disminuyen la retención de humedad, incrementa los problemas de erosión y restringen el aprovechamiento de nutrientes, lo que reduce su capacidad productiva (Six *et al*., 2004). En Corrales, Canal y Duraznos su textura arcillosa, la labranza continua y el bajo a moderado contenido de MO debilitan la estabilidad de agregados formando una capa de arado), interrumpiendo la continuidad de macroporos (Assouline, 2004), elevando la resistencia al enraizamiento y favoreciendo el anegamiento del suelo (Batey, 2009; Hamza y Anderson, 2005).

Se seleccionaron dos componentes principales, los cuales explicaban el 81% de la varianza acumulada, en donde las variables con mayor influencia fueron la materia orgánica, pH y densidad aparente. Si bien, el pH alcalino disminuye la disponibilidad macros y micronutrientes (Marschner, 2012) tales como el fosforo útil para el desarrollo de raíces y floración (Fernández, 2007) pero es el manejo quien tiene una fuerte influencia sobre la aptitud del suelo, lo que puede verse reflejado en la evaluación visual

Se registraron 17 especies de arvenses en Duraznos y Canal (nueve nativas y ocho introducidas), con una gran predominancia de Asteraceae, Poaceae y Amaranthaceae. Las arvenses introducidas tienden a ser más agresivas en suelos perturbados (Rendon-Aguilar *et al*., 2021) y, en particular, gramíneas como *Poa annua* quienes reducen la diversidad nativa como consecuencia de los manejos intensivos en el uso de herbicidas y fertilizantes químicos (Rivera-Ramírez *et al*., 2021).

Se observó que en todas las series existe un bajo contenido de MO, explicando en gran medida la densidad aparente moderada, la baja aportación de carbono orgánico por mineralización y débil desarrollo de agregados (Blanco-Canqui *et al*., 2024; Kranz *et al*., 2020), dando como resultado su mala aptitud para el desarrollo agrícola. Para revertir simultáneamente el bajo contenido de materia orgánica, la estabilidad de agregados y los efectos del pH sobre la nutrición, se propone las siguientes aportaciones orgánicas ajustados para cada serie y tipo de enmiendas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Dosis anual de enmiendas orgánicas por serie para alcanzar 3.5% de MO a una profundidad de 20 cm.

Serie	**MO (kg ha^{-1})**	**Adición de MO (ton ha^{-1} por año)**				**Incremento por año**	
		E	Ec	C	V	MO (% ha^{-1})	CO (% ha^{-1})
Canal	46.30	128.63	42.90	31.25	20.60	0.18	0.31
Corrales	35.46	98.48	32.85	27.98	15.75	0.14	0.24
Duraznos	58.89	163.60	54.53	39.78	26.18	0.20	0.35
Estación	52.59	146.08	48.72	35.50	23.38	0.18	0.31

Nota: MO= Materia Orgánica; E= Estiércol; Ec= Estiércol en compost; C= Compost de pasto; V= Vermicompost; CO= Carbono Orgánico.

Se ha demostrado que la vermicompost, por sus componentes tales como el ácido húmico y nutrientes disponibles, favorece a la rápida germinación de semillas y al desarrollo de las raíces (Bhat *et al*., 2017); además, la fragmentación por lombrices genera partículas más porosas y con mayor área superficial, propiedades que ayudan a la porosidad y agregación cuando se mezcla con el suelo (Pathma y Sakthivel, 2012). También, la importancia de aplicar compostas "maduras" puede funcionar como acondicionadores del suelo otorgando beneficios en una baja Da y alta porosidad, mejorando su infiltración y aireación (Rivas-Nichorzon y Silva-Acuña, 2020).

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que la calidad de los suelos del Colegio de Postgraduados campus Montecillo es de moderada a muy mala, limitando su aptitud agrícola. Los principales factores determinantes identificados fueron el bajo contenido de materia orgánica, una densidad aparente ligeramente elevada, el pH alcalino y la degradación de la estructura por la labranza continua, los cuales tiene una relación con la presencia de arvenses introducidas como bioindicadores de perturbación del suelo. Para contrarrestar estas limitaciones, es importante suministrar enmiendas orgánicas diseñado

específicamente para incrementar el contenido de materia orgánica y mejorar la calidad del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

Bautista, C. A., Etchevers, B.A, del Castillo, R.F. & Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas*, 13, 90-97.

Bhat, S. A., Singh, J. & Vig, A. P. (2017). Instrumental characterization of organic wastes for evaluation of vermicompost maturity. *Journal of Analytical Science and Technology*, 8(2). https://doi.org/10.1186/s40543-017-0112-2.

Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J.W. & Brussaard, L. (2018). Soil quality–A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120(1), 105-125. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

Carranza-Edwards, A. (2018). Correlación litológica del subsuelo del lago de Texcoco. *Hidrobiológica*, 28(1), 93-101. https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2018v28n1/Carranza

De la Cruz-Elizondo, Y. & Fontalvo-Buelvas, J. C. (2019). Evaluación de la calidad del suelo de un huerto urbano en Xalapa, México. *Suelos ecuatoriales*, 49(1 y 2), 29-37.

Escobar-Perea, Y., Vargas-Batis, B., Fuentes-Miranda, O., Rodríguez-Osorio, O. & Molina-Lores, L. B. (2017). Evaluación visual de la calidad del suelo en cuatro fincas de la agricultura suburbana de Santiago de Cuba. *Ciencia en su PC* 3(1), 13-28.

FAO. (2019). Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1). Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. Rome, FAO. 170 pp.

FAO. (2020). A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. Rome. https://doi.org/10.4060/cb0509en

Félix-Herrán, J. A., Serrato-Flores, R., Armenta-Bojorquez, A. D., Rodríguez-Quiroz, G., Martínez-Ruiz, R., Azpiroz-Rivero, H. S. & Olalde-Portugal, V. (2010). Propiedades microbiológicas de compostas maduras producidas a partir de diferente materia orgánica. *Ra Ximhai*, 6(1), 105-113.

Fernández, M.T. (2007). Fósforo: amigo o enemigo. ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, 41(2), 51-57.

García, Y., Ramírez, W. & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y forrajes* 35(2), 125-138.

González, L., Ortiz, C.A. & Castorena, M. (2012). Los suelos del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. México. (Documento inédito)

Gutiérrez-Castorena, M. C. (2025). Manual para la descripción de perfiles de Suelo. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. México. (Documento inédito).

Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F. & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: A concept, definition and framework for evaluation. Soil Sci. Soc. Am. J. 61: 4-10. https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100010001x

Marschner, P. (2012). Mineral Nutrition of Higher Plants (Third edition). Academic Press.

Nuñez-Peñaloza, J.L., Pérez-Nieto, J. & Prado-Hernández, J.V. (2023). Análisis de indicadores e índices de calidad de suelos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 14*(6). https://doi.org/10.29312/remexca.v14i6.3148

Pathma, J. & Sakthivel, N. (2012). Microbial diversity of vermicompost bacteria that exhibit useful agricultural traits and waste management potential. *SpringerPlus*, 1(26). https://doi.org/10.1186/2193-1801-1-26

Pribyl, D. W. (2010). A critical review of the conventional SOC-to-SOM conversion factor. *Geoderma* 156(3–4), 75–83. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003

Rendón-Aguilar, B., Velázquez-Cárdenas, X. M., Morales-Gutiérrez, K., Camero-Aguilar, D., de Santiago-Gómez, J. R. & Rivera-Ramírez, I. (2024). Ecological attributes of weeds as indicators of sustainability in agroecosystems of the southeastern region of Mexico City. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 27(103).

Rivas-Nichorzon, M. & Silva-Acuña, R. (2020). Calidad física y química de tres compost, elaborados con residuos de jardinería, pergamino de café y bora (*Eichhornia Crassipes*). *Revista Ciencia* UNEMI 13(32), 87-100.

Rivera-Ramírez, I., Ríos-De la Cruz, A., Bravo-Avilez, D., Bernal-Ramírez, L. A., Velázquez-Cárdenas, Y., de Santiago-Gómez, J. R., Lozada-Pérez, L. & Rendón-Aguilar, B. (2021). Riqueza, abundancia y composición de arvenses en parcelas sujetas a diferentes prácticas agrícolas en la Alcaldía de Cuajimalpa, Ciudad de México. *Revista Etnobiología* 19(1), 129–155.

Ruiz C., J. A., Medina G., G., González A., I . J., Flores L., H. E., Ramírez O., G., Ortiz T., C., Byerly M., K. F. & Martínez P., R. A. (2013). *Requerimientos agroecológicos de cultivos*. Segunda edición. Libro técnico núm. 3. INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias – CIRPAC – Campo Experimental Centro Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México. 564p

Rzedowski, J. & Calderón de Rzedowski, G. (2005). *Flora fanerogámica del Valle de México* (2.ª ed.). Instituto de Ecología, A.C. / Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

Santos-Francés, F., Martínez-Graña, A., Ávila-Zarza, C., Criado, M. & Sánchez, Y. (2019). Comparison of methods for evaluating soil quality of semiarid ecosystem and evaluation of the effects of physico-chemical properties and factor soil erodibility (Northern Plateau, Spain). *Geoderma* 354(1), 113872.

Shepherd, T. G. (2000). Visual Soil Assessment (VSA). Volume 1: Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country.

Siebe, C., Rosales-Lagarde, L. & Schaaf, P. (1996). Late Holocene paleoenvironments of the former lake Texcoco. *Quaternary Research* 46(1), 65–75. https://doi.org/10.1006/qres.1996.0043

Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S. & Denef, K. (2004). A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7-31. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008

Toole, E. V. (2019). Palaeoenvironmental and palaeogeographic reconstruction of the Te-quixquiac Basin, Central Eastern Mexico: Mid to late Pleistocene environ-ments. Liverpool John Moores University (United Kingdom).

Trinidad-Santos, A. & Velasco-Velasco, J. (2016). Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agroproductividad* 9(8): 52-58.

Van-Reeuwijk, L. P. (2002). Procedures for soil analysis. International Soil Reference andInformationCenter. 6aed. Wageningen, TheNetherlands.

Vibrans, H. (2021). *Las malezas como indicadoras ambientales*. En C. A. González Zuarth, A. Vallarino, J. C. Pérez Jiménez & A. M. Low Pfeng (Eds.), *Bioindicadores: Guardianes de nuestro futuro ambiental* (pp. 30–39). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

FERTILIDAD QUÍMICA EN SUELOS CULTIVADOS CON MAÍZ DE TEMPORAL EN SUELOS ANDOSOLS

Ángel Lisandro Mancilla Solis[1;] Daniel Torres Nava[1;] Gerardo Cruz Flores[2]

[1]Universidad Intercultural del Estado de México Plantel Tepetlixpa, área Desarrollo Sustentable Tepetlixpa Estado de México.
[2] Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México, FESZ UNAM. Av Guelatao 66, Ejército de Oriente Indeco II ISSSTE, Iztapalapa, 09230, CDMX, México.

Correo del autor de correspondencia: dtorres.nava@gmail.com

RESUMEN

Los andosoles son suelos que pueden ser aptos para la agricultura debido a algunas de sus propiedades físicas como alta retención de agua, baja densidad aparente que le brinda buena porosidad, sin embargo, también presentan algunas condiciones adversas con la alta retención de fosforo por su riqueza en minerales amorfos como los alófonos y aunque son suelos ricos en materia orgánica cuando se modifica el cambio de uso de suelo los contenidos de ésta bajan drásticamente. Con base en lo anterior, el objetivo de este trabajo fue conocer los niveles de los macronutrientes en una localidad agrícola que posee suelos andosoles. El estudio se llevó a cabo en la comunidad de San Juan Tehuixtitlan del municipio de Atlautla. Edo de México donde se recolectaron 40 muestras de suelo y se analizaron sus propiedades químicas como pH, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio, siguiendo la norma NOM-021-SEMARNAT-2000. Los resultados mostraron que los suelos de San Juan Tehuixtitlan presentan altos niveles de fósforo disponible, probablemente por la continua fertilización con fósforo aceptando que existe alto riesgo de pérdidas de éste y eutrofización de cuerpos de agua. En contraste, muestran deficiencias de nitrógeno total, potasio intercambiable y bajo contenido de materia orgánica, ante la casi nula aplicación de abonos orgánicos, la ausencia de rotación de cultivos y la poca aplicación de enmiendas orgánicas. El pH es ligeramente ácido, lo que puede agravar la lixiviación de nutrientes y movilizar elementos tóxicos. Se recomienda un manejo integral que incluya rotación de cultivos, fertilización balanceada, incorporación constante de materia orgánica y corrección de acidez para asegurar la sostenibilidad y productividad agrícola.

PALABRAS CLAVE: *Fosforo; materia orgánica; nitrógeno.*

INTRODUCCIÓN

Los Andosols es el principal grupo de suelos de referencia en la cuenca del Valle de México y su principal uso es la agricultura, debido a que presentan buena retención de agua, alta permeabilidad, alto contenido de materia orgánica, son suelos agrícolas altamente productivos (Dahlgren *et al*., 2004). Sin embargo, en la zona del valle de México se caracteriza por los bajos rendimientos lo que fomenta el uso inmoderado de agroquímicos y fertilizantes. Generalmente los agricultores no están bien capacitados y no suelen realizar mediciones de fertilidad del suelo (Secretaría de Ecología, 1999) lo que

provoca un desgaste de los suelos. Se ha observado que cuando estos suelos cambian a un uso agrícola hay un cambio en el contenido de carbono (Smith, 2008). Se estima que, a nivel mundial, alrededor del 25% de la tierra está degradada y se pierden anualmente 24000 millones de toneladas de suelo fértil debido a prácticas agrícolas insostenibles (Fondo para el Medio Ambiente Mundial, 2022). En los suelos andosoles el fósforo (P) es un nutriente limitante porque presentan una alta capacidad de fijación de P debido a sus altas concentraciones de óxidos de Al y Fe, cuando se aplican continuamente grandes cantidades de fertilizantes fosfatados a los campos de andosoles. Cuando el aporte de P proveniente de fertilizantes excede al requerido en la producción de P en el cultivo, la acumulación de P en el suelo aumenta gradualmente con el tiempo (Kuo *et al.*, 2005). Las características de los suelos andosoles hacen que el ciclo del nitrógeno se comporte de manera distinta, por ejemplo. Se ha encontrado una pérdida volatilización de amoníaco en los suelos de tipo Andosol (Hayashi *et al*., 2011). Por lo tanto, conocer el contenido proveniente del fosforo y nitrógeno será importante para determinar las estrategias de fertilización y así lograr un mejor manejo de nutrientes y evitar un impacto ambiental y económico al productor de la zona. Respecto al potasio se ha observado que cuando hay un cambio de uso de suelo en los andosoles, este nutriente se ve fuertemente afectado (Avilés *et al*., 2025). Bajo este contexto el objetivo este trabajo fue evaluar las reservas de N, P y K para proponer el manejo de los niveles de macronutrientes en los suelos cultivados de maíz bajo temporal para elevar los rendimientos sin degradar los suelos de la comunidad de San Juan Tehuixtitlan del municipio de Atlautla del estado de México.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio. El estudio se llevó a cabo en la comunidad de San Juan Tehuixtitlan, pertenece al municipio de Atlautla de Victoria en el Estado de México., su distancia aprox. a la cabecera municipal es de 3 km. Y se localiza entre los paralelos 98°45'57.361 de Longitud y 19°03'04.190 de Latitud, y a una altitud promedio de 2,433 msnm. La localidad se encuentra en el Eje Neovolcánico. Su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad la temperatura promedio oscila anualmente entre 2 y 20°C con una precipitación media anual de 800 a 1300 mm. Su actividad predominante es la agricultura (INEGI, 2020).

Recolecta de muestras y análisis de suelo. Se diseño un plan de muestreo que incluyó la colecta de un total de 40 muestras de suelos de la capa arable, durante un periodo de 3 meses entre enero y marzo de 2025. Estas muestras se secaron al aire e hicieron pasar por un tamiz con una malla de 2 mm y se procesaron con base en los métodos establecidos en la norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) para determinar las siguientes propiedades químicas: pH, materia orgánica, nitrógeno total, fósforo disponible, y potasio intercambiable. Las determinaciones se realizarán en el Laboratorio de Física de Suelos y las determinaciones químicas en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos, del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se muestran los resultados de los niveles de fertilidad química del suelo.

Fósforo. Los suelos de la zona presentan altos niveles de fosforo. Esto puede estar relacionado con la muy alta capacidad de fijación de P en los Andosoles, que es causada por el aluminio (Al) y el hierro (Fe) activos y su mineralogía de arcilla amorfa (alófana) (Batjes, 2011). La acumulación de P en suelos agrícolas puede aumentar el riesgo potencial de pérdidas de P en lagos y arroyos, y puede acelerar su eutrofización.

Cuadro 1. Niveles de Fertilidad química de los suelos

	pH	M. Org.	Nt	P-Disp	K-Int.
		_____ % _____		mg kg^{-1}	$cmol_+ kg^{-1}$
Promedio	5.63	0.805	0.08	167	0.33
Desviación estandar	0.387	0.487	0.03	128	0.205
Mínimo	5.00	0.328	0.03	16.3	0.012
Máximo	6.6	1.9	0.22	488	1.00

Nitrógeno. Los niveles de nitrógeno se encuentran bajos comparado con otros trabajos realizados en Andosols, se estima que los cereales tienen una eficiencia del 38% en la recuperación de nitrógeno, esto se debe una gestión ineficiente de la fertilización y un nula rotación de cultivos en especial con leguminosas, lo que puede ocasionar a bajas tasas de aplicación de N, debido al crecimiento limitado de las plantas debido a desequilibrios de nutrientes y otras limitaciones bióticas o abióticas, posiblemente incluyendo deficiencias de P y otros nutrientes esenciales (Bekele *et al.,* 2022).

Potasio. De acuerdo Matsumoto *et al.* (2023) los niveles de promedio de potasio están relativamente bajos, esto se debe a que los productores no aplican fertilizantes potásicos ni compostas que incluyeran K. Estos hechos implicaron que el K fue suministrado por materiales parentales como cenizas volcánicas en la capa superficial a través del proceso de meteorización o derivado de la subcapa.

Materia orgánica. Los suelos presentan bajos niveles de materia orgánica ya que de acuerdo a la NOM-021 se considera un bajo nivel de materia orgánica si está por debajo del 4%. Una explicación de esto es debido a la frecuencia de laboreo y a los bajos niveles y frecuencia de materia orgánica que aplican los productores, lo que afecta la estructura del suelo, y el pH (Mbuthia *et al.,* 2015). Estas actividades alteran la química y la estructura del suelo, proporcionando condiciones favorables para los microbios que aceleran el ciclo del carbono (de Cárcer *et al.*, 2019). Mantener un nivel adecuado de MOS debe ser el principio rector para asegurar la funcionalidad del ecosistema y la fertilidad sostenible del suelo.

pH. El pH presentó un valor promedio que lo acerca a ligera acidez, esto puede deberse a la baja incorporación de la materia orgánica y si se sigue con esta tendencia puede ser perjudicial para la fertilidad de los suelos al acelerar la lixiviación de nutrientes y movilizar cationes tóxicos como Al en la solución del suelo (Guicharnaud y Paton, 2006). Por lo que se recomendaría la incorporación de materia orgánica y el encalado de suelos.

CONCLUSIONES

En conjunto, los suelos presentan un desequilibrio nutricional marcado: exceso de fósforo, deficiencias en nitrógeno, potasio y materia orgánica, así como una acidez incipiente. Un manejo integral que contemple rotación de cultivos, aportes balanceados de fertilizantes, incorporación sistemática de materia orgánica y corrección de pH es fundamental para garantizar la sostenibilidad y productividad del sistema agrícola de maíz de la comunidad de San Juan Tehuixtitlan.

BIBLIOGRAFÍA

Avilés-Junco, C., Prado-Pano, B., Mora-Palomino, L., Velázquez, A., Abbruzzini, T.F. & Siebe, C. (2025). Integrated multiscale assessment of andosol degradation after conversion from grasslands to agriculture. *Catena,* 250, 108731.

Batjes, N. H. (2011). Global distribution of soil phosphorus retention potential. https://edepot.wur.nl/185289

Bekele, I., Lulie, B., Habte, M., Boke, S., Hailu, G., Mariam, E.H., Sileshi, G.W. (2022). Response of maize yield to nitrogen, phosphorus, potassium and sulphur rates on Andosols and Nitisols in Ethiopia. Experimental Agriculture. 58.

Carpenter, S.R., Caraco, N.F., Correll, D.L., Howarth, R.W., Sharpley, A.N. & Smith, V. H. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological applications,* 8(3), 559-568.

Dahlgren, R.A., Saigusa, M. & Ugolini, F.C. (2004). The nature, properties and management of volcanic soils.

Global Environmental Facility. (2022). Global Environmental Facility Land Degradation | GEF [WWW Document].

Guicharnaud, R. & Paton, G.I. (2006). An evaluation of acid deposition on cation leaching and weathering rates of an Andosol and a Cambisol. *Journal of geochemical Exploration,* 88(1-3), 279-283.

Eneji, A. E., Irshad, M., Honna, T., Yamamoto, S., Endo, T. & Masuda, T. (2003). Potassium, calcium, and magnesium mineralization in manure-treated soils. *Communications in soil science and plant analysis,* 34(11-12), 1669-1679.

Hayashi, K., Koga, N. & Fueki, N. (2011). Limited ammonia volatilization loss from upland fields of Andosols following fertilizer application. Agric. *Ecosyst. Environ.* 140, 534–538.

Kuo, S., Huang, B. & Bembenek, R. (2005). Effects of long-term phosphorus fertilization and winter cover cropping on soil phosphorus transformations in less weathered soil. B*iol. Fertil. Soils*, 41, 116–123.

Takahashi, S. & Anwar, M.R. (2007). Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. *Field Crops Research,* 101(2), 160-171.

Secretaría de Ecología. (1999). Ordenamiento ecológico del territorio del Estado de México, gaceta del Gobierno No. 106, Gobierno del Estado de México, 34. SEDUE (S/F) Manual de ordenamiento ecológico del Territorio, Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, México.

Smith, P. (2008). Land use change and soil organic carbon dynamics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems,* 81(2), 169-178.

de Cárcer, P.S., Sinaj, S., Santonja, M., Fossati, D. & Jeangros, B. (2019). Long-term effects of crop succession, soil tillage and climate on wheat yield and soil properties. *Soil and Tillage Research,* 190, 209-219.

Sharpley, A.N., McDowell, R.W. & Kleinman, P.J. (2004). Amounts, forms, and solubility of phosphorus in soils receiving manure. *Soil science society of America journal,* 68(6), 2048-2057.

Mbuthia, L. W., Acosta-Martínez, V., DeBruyn, J., Schaeffer, S., Tyler, D., Odoi, E., Eash, N. (2015). Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality. *Soil Biology and Biochemistry,* 89, 24-34.

Matsumoto, T., Cifuentes, O. & Masunaga, T. (2013). Characterization of soil properties in relation to maize productivity in Andosols of the western highland of Guatemala. *Soil Science and Plant Nutrition,*59(2), 195-207

Marschner, H. (1995). The soil-root interface (rhizosphere) in relation to mineral nutrition. *Mineral nutrition of higher plants,* 537-595.

FERTILIZACIÓN INTEGRAL Y ACTIVIDAD FISIOLÓGICA EN MAÍZ BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE LABRANZA

Carlos Alexis Urbina Gaza[1]; Blanca Estela Santiago Mejía[2]; Yolanda del Rocío Moreno Ramírez[1]; José Alberto López Santillán[1]; Julio Cesar Chacón Hernández[1]; Efraín Neri Ramírez[1]; Mario Rocandio Rodríguez[1]

[1] Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, 87000, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México.
[2] Campo Experimental Río Bravo, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, 88900, Río Bravo, Tamaulipas, México.

Correo del autor de correspondencia: mrocandio@docentes.uat.edu.mx

RESUMEN

La fertilización integral y la disminución de la labranza favorecen el rendimiento de los cultivos y la sustentabilidad de los sistemas de producción agrícola. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de distintos sistemas de labranza y fuentes de fertilización sobre parámetros fisiológicos en el maíz. El experimento se realizó en el ciclo O-I 2024, en el rancho "Las Águilas" ubicado en las coordenadas 24°02´03" LN, 98°53´38" LO, en el municipio de Padilla, Tamaulipas, México. Se evaluaron seis combinaciones de fertilización (orgánica y química) y cuatro sistemas de labranza, en un diseño de bloques completos al azar con arreglo de parcelas divididas. Las variables analizadas fueron: el índice relativo de clorofila y la concentración de nitratos foliares. Se realizó un análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$). De los tratamientos de fertilización evaluados, la combinación química (75%)-orgánica (25%) en labranza convencional, cero y mínima-rastra, así como, química (50%)-orgánica (50%) en labranza convencional mostraron una mayor eficiencia fotosintética, ya que la concentración de nitratos en las hojas de maíz disminuyó una vez entrada a la etapa de floración, atribuyéndose a que el índice relativo de clorofila en este tratamiento mantiene valores sobresalientes en comparación al tratamiento 100% químico, testigo y demás combinaciones, lo cual indica que el nitrógeno y productos fotosintéticos se aprovecharon para el llenado de grano.

PALABRAS CLAVE: *Fertilización combinada; Índice relativo de clorofila; Labranza reducida; Nitratos; Zea mays.*

INTRODUCCIÓN

El maíz desempeña un papel fundamental en los sistemas de producción, debido a sus atributos de rendimiento, adaptabilidad y estabilidad de producción (Martínez-Gutiérrez *et al*., 2022), donde, particularmente, el rendimiento depende de las condiciones meteorológicas y de las prácticas agrícolas aplicadas (Maitah *et al*., 2021).

Aumentar el rendimiento por unidad de superficie con el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados como principal fuente de nutrientes (Zhou *et al*., 2025; Li *et al*., 2023), desencadena una serie de problemáticas: costos de producción elevados (Zhou *et al*.,

2025) y disminución de la eficiencia del uso del N (Meng *et al*., 2018). En este sentido, optimizar el uso de este es esencial para lograr una producción estable y sostenible (Zhou *et al*., 2025). Una fertilización equilibrada junto a la gestión adecuada de la labranza favorece el rendimiento de los cultivos, ya que cuando se utiliza de manera intensiva trae consigo impactos negativos sobre la productividad del sistema de producción.

En el estado de Tamaulipas los principales problemas de producción son: costos de producción (78.9%), factores climáticos (65.6%), factores biológicos (25.5%), pérdida de fertilidad del suelo (22.2%) (INEGI, 2023), esta última relacionada con niveles bajos de materia orgánica, menores al 1.5%, derivados del uso indiscriminado de la labranza (INIFAP, 2020). El rendimiento del maíz depende del suministro de asimilados producidos en las hojas y otros tejidos fotosintéticos y su transporte a los granos (Liu *et al*., 2022), sin embargo, el suministro se ve afectado por la disminución de la fertilidad del suelo, lo cual limita la accesibilidad a los nutrientes para cumplir con sus funciones metabólicas (Saleem *et al*., 2023). Bajo este contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de cuatro sistemas de labranza, seis combinaciones de fertilización y su dinámica sobre aspectos fisiológicos en el cultivo de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el rancho "Las Águilas" ubicado en las coordenadas 24°02´03" LN, 98°53´38" LO, en el municipio de Padilla, Tamaulipas, México. El germoplasma utilizado fue el híbrido H-443A. Los sistemas de labranza fueron: labranza convencional (LC): rastra cruzada, barbecho, rastra, bordeo y siembra; labranza mínima subsoleo (LMS): subsoleo vertical, rastra cruzada, bordeo y siembra; labranza mínima-rastra (LMR): rastra cruzada, bordeo y siembra; labranza cero (L0): bordeo y siembra. Los tratamientos de fertilización se muestran en el Cuadro 1. La siembra se realizó en el ciclo O-I 2024, a una densidad de 62,500 plantas ha^{-1}, bajo condiciones de riego. El diseño experimental fue en bloques completos al azar con arreglo de parcelas divididas, donde la parcela grande fue la labranza y los tratamientos de fertilización la parcela chica. Cada sistema de labranza fue de 20 m de ancho y 18 m de longitud. La unidad experimental fue de cuatro surcos por seis metros de longitud, y una distancia entre surcos de 0.8 m. Las variables analizadas fueron: el índice relativo de clorofila (SPAD) y el contenido foliar de nitratos (NO_3^-) en tres etapas de desarrollo del cultivo (55, 80 y 90 dds). Para el SPAD, se tomaron lecturas de 10 plantas con tres repeticiones, con el SPAD-502 Minolta, en cada unidad experimental. La cuantificación de NO_3^- se realizó con 0.5-1.0 g de hoja de cinco plantas por unidad experimental y tres repeticiones. Se maceró con agua destilada con relación p/v de 1:8 para la obtención de la savia vegetal. Para homogenizar y reducir interferencias en las mediciones se utilizó la metodología propuesta por Di Gioia *et al*. (2010) modificada, centrifugándose durante 7 minutos a 3500 rpm. Se obtuvieron 500 µL del sobrenadante, el cual se depositó en el equipo portátil de NO_3^- LAQUAtwin® previamente calibrado. Para el análisis estadístico de las variables se realizó un análisis de varianza y una comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$).

Cuadro 1. Descripción de las combinaciones de fertilización aplicadas.

Fuente de fertilización	Dosis y etapa de aplicación
Fertilización química 100%* (Q100).	Vía edáfica: fosfato diamónico (18-46-00) 87.00 kg ha^{-1} siembra; UREA (46-00-00) 270.00 kg ha^{-1} escarda.
Fertilización química 75%, orgánica 25% (Q75-O25).	Vía edáfica: fosfato diamónico (18-46-00) 65.25 kg ha^{-1}, inoculación de semilla (*Rhizophagus intraradices*) y lixiviado de composta 125 L ha^{-1} al momento de la siembra; gallinaza 1 t ha^{-1} y UREA (46-00-00) 202.50 kg ha^{-1} escarda.
Fertilización química 50%, orgánica 50% (Q50-O50).	Vía edáfica: fosfato diamónico (18-46-00) 43.50 kg ha^{-1}, inoculación de semilla (*Rhizophagus intraradices*) y lixiviado de composta 250 L ha^{-1} al momento de la siembra; gallinaza 1 t ha^{-1} y UREA (46-00-00) 135.00 kg ha^{-1} escarda.
Fertilización química 25%, orgánica 75% (Q25-O75).	Vía edáfica: fosfato diamónico (18-46-00) 21.75 kg ha^{-1}, inoculación de semilla (*Rhizophagus intraradices*), y lixiviado de composta 375 L ha^{-1} al momento de la siembra; gallinaza 1 t ha^{-1} y UREA (46-00-00) 67.50 kg ha^{-1} escarda.
Fertilización orgánica 100%** (O100).	Vía edáfica: inoculación en semilla (*Rhizophagus intraradices*), y lixiviado de composta 500 L ha^{-1} al momento de la siembra; gallinaza 1 t ha^{-1} escarda.
Sin fertilización.	

*Fertilización química 100% recomendada para hibrido H-443A: 140-40-00 ha^{-1} (Reyes *et al*., 2009); **Fertilización orgánica lixiviado de composta 100% recomendada 500 L ha^{-1} (Santiago y Espinosa, 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este estudio se observó que la acumulación de NO_3^- en las hojas disminuyó a partir de la etapa de floración, posterior a los 55 dds (Cuadro 2), este comportamiento se mantuvo durante la etapa de llenado de grano 80 y 90 dds, lo que indica una traslocación del nitrógeno para su aprovechamiento para la formación de órganos reproductivos y llenado de granos. En cuanto a la eficiencia de este proceso, según los valores de SPAD (Cuadro 2), indican que la combinación Q75-O25 con LC, L0, Q100 y Q75-O25 con LMS, Q50-O50 con LC y Q75-O25 LMR, mostraron valores sobresalientes, lo que indica que el cultivo mantuvo un área foliar verde y la producción de más productos fotosintéticos (Zhou *et al*., 2025). Para los NO_3^-, los tratamientos con valores óptimos fue Q50-O50 en L0, Q50-O50 en LC y LMR, y Q75-O25 en LMS, ya que estos tratamientos mantienen valores deseables de este parámetro y valores sobresalientes de SPAD, con base en estudios realizados por Sharifi *et al*. (2023) que obtuvieron rangos de NO_3^- de 100 a 500 ppm, en una dosis de fertilización química 150N-45P.

En términos generales, LC mostró un mejor comportamiento, particularmente con el tratamiento combinado Q75-O25, el cual tiene un potencial significativo para reducir la fertilización química (Han *et al*., 2024). Estudios realizados por Wang *et al*. (2025) afirman que la sustitución del 25% de fertilización química con fertilización orgánica favorece este proceso, ya que la coordinación del metabolismo del carbono y el nitrógeno se mejora, al optimizar las características fisiológicas fotosintéticas, que promueve la distribución racional de los asimilados fotosintéticos (Urban *et al*., 2021). Este efecto pudo ser derivado por el suministro adecuado de nitrógeno del suelo (Wu *et al*., 2022), ya que la adición de

fertilizante orgánico mejora el ciclo del nitrógeno y aumenta su disponibilidad para las plantas (Wang *et al*., 2023).

Cuadro 2. Comparación de medias para la interacción de los sistemas de labranza y las fuentes de fertilización sobre las variables IRC y NO_3^-.

Tratamiento	Variables/DDS											
	IRC (SPAD)						NO_3^-(ppm)					
	55		80		90		55		80		90	
Labranza × Fertilización												
L0												
× Q100%	38.37	A	33.21	F	49.42	A	3790.67	A	1893.33	BC	582.93	H
× O100%	34.83	A	37.39	EF	46.39	A	3465.33	A	1262.67	DE	757.87	GH
× Q25-O75	33.53	A	37.95	EF	48.12	A	4126.67	A	1260.80	DE	865.07	FGH
× Q50-O50	36.52	A	43.08	BCDE	52.30	A	4756.00	A	1149.33	DE	1098.70	CDEFG
× Q75-O25	37.25	A	45.78	ABCDE	55.08	A	4700.00	A	941.87	DE	882.13	FGH
× S/F	30.71	A	37.65	EF	43.12	A	4760.00	A	1274.74	DE	1152.00	BCDEF
LC												
× Q100	43.13	A	43.11	BCDE	53.24	A	5146.67	A	1285.33	DE	1322.67	ABCD
× O100	42.11	A	43.51	BCDE	51.74	A	4553.33	A	1360.00	CDE	873.60	FGH
× Q25-O75	45.66	A	44.42	BCDE	50.07	A	5246.67	A	1074.13	DE	1120.00	BCDEFG
× Q50-O50	44.12	A	47.90	ABC	56.01	A	6000.00	A	868.80	E	1109.30	BCDEFG
× Q75-O25	48.32	A	53.85	A	55.90	A	4220.00	A	992.53	DE	1018.70	CDEFG
× S/F	40.99	A	47.58	ABC	47.83	A	6113.33	A	934.93	DE	1333.30	ABC
LMR												
× Q100	41.98	A	44.51	BCDE	54.21	A	4713.33	A	1034.67	DE	1269.30	ABCDE
× O100	37.40	A	38.45	DEF	50.32	A	6366.67	A	1152.00	DE	1488.00	AB
× Q25-O75	38.47	A	43.92	BCDE	53.03	A	7866.67	A	1232.00	DE	1610.70	A
× Q50-O50	40.58	A	47.67	ABC	54.76	A	8719.11	A	1477.33	CD	1034.70	CDEFG
× Q75-O25	41.81	A	45.59	ABCDE	54.85	A	9105.56	A	1388.80	CDE	1083.70	CDEFG
× S/F	35.47	A	39.01	CDEF	46.15	A	8984.37	A	875.20	E	963.73	CDEFG
LMS												
× Q100	42.70	A	48.28	AB	55.81	A	6042.22	A	1079.47	DE	946.67	DEFGH
× O100	35.77	A	41.98	BCDE	49.71	A	6678.33	A	825.07	E	903.47	EFGH
× Q25-O75	38.77	A	45.07	BCDE	53.61	A	6119.44	A	1082.67	DE	994.67	CDEFG
× Q50-O50	40.23	A	47.09	ABCD	53.39	A	6940.00	A	1866.67	BC	1168.00	BCDEF
× Q75-O25	42.49	A	44.76	BCDE	55.92	A	7855.00	A	2138.67	AB	1039.47	CDEFG
× S/F	33.62	A	42.34	BCDE	47.77	A	8666.67	A	2693.33	A	1173.30	BCDEF

Las interacciones con menores valores de SPAD fueron la L0 con Q100, a los 80 dds, mientras que para NO_3─ en la Q100 a los 90 dds, que serían los menos favorables.

CONCLUSIONES

La combinación de fertilizantes químicos y orgánicos en proporción 75-25% y 50-50% mostró ser la estrategia de fertilización más eficiente dentro de los sistemas labranza cero, mínima subsuelo y convencional. La sinergia nutricional señalada, incidió de manera positiva en el comportamiento entre el índice relativo de clorofila y nitratos, demuestra una eficiencia fotosintética durante la etapa de floración y llenado de grano.

BIBLIOGRAFÍA

Di Gioia, F., Simonne, E.H., Gonnella, M., Santamaria, P., Gazula, A. & Sheppard, Z. (2010). Assessment of ionic interferences to nitrate and potassium analyses with ion-selective electrodes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 41:1750-1768. https://doi.org/10.1080/00103624.2010.489138.

Han, K., Li, X., Jia, L., Yu, D., Xu, W., Chen, H., Song, T. & Liu, P. (2024). Optimizing tillage and fertilization practices to improve the carbon footprint and energy efficiency of wheat-maize cropping systems. *Journal of Integrative Agriculture*, 2024:1-23. https://doi.org/10.1016/j.jia.2024.03.026.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2023). Censo 2022 agropecuario: resultados definitivos Tamaulipas. México.

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (2020). Impulsan la agricultura de conservación para la seguridad alimentaria. México.

Li, H., Zhang, Y., Sun, Y., Liu, P., Zhang, Q., Wang, X., Wang, R. & Li, J. (2023). Long-term effects of optimized fertilization, tillage and crop rotation on soil fertility, crop yield and economic profit on the Loess Plateau. *European Journal of Agronomy*, 143:1-10. https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126731.

Liu, G., Yang, Y., Guo, X., Liu, W., Xie, R., Ming, B., Xue, J., Wang, K., Li, S. & Hou, P. (2022). Coordinating maize source and sink relationship to achieve yield potential of 22.5 Mg ha^{-1}. *Field Crops Research*, 283.

Maitah, M., Malec, K. & Maitah, K. (2021). Influence of precipitation and temperature on maize production in the Czech Republic from 2002 to 2019. *Scientific Reports*, 11:1-11. https://doi.org/10.1038/s41598-021-89962-2

Martínez-Gutiérrez, A., Zamudio-González, B., Cardoso, G.J.C., Espinosa-Calderón, A., Tadeo-Robledo, M., Vázquez-Alarcón, A. & Villegas-Aparicio, Y. (2022). Efecto de aminoácidos foliares en la extracción y remoción de nutrientes en maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 45:173-181. https://doi.org/10.35196/rfm.2022.2.173.

Meng, Q., Cui, Z., Yang, H., Zhang, F. & Chen, X. (2018). Establishing high-yielding maize system for sustainable intensification in China. *Advances in Agronomy*, 148:85-109. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.11.004

Reyes, M., C.A., Cantú, A.M.A., de la Garza, C.M., Vázquez, C.G. & Córdova, O.H. (2009). H-443A, hibrido de maíz de grano amarillo para el noreste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32:331-333.

Saleem, S., Mushtaq, N.U., Rasool, A., Shah, W.H., Tahir, I. & Rehman, R.U. (2022). Plant nutrition and soil fertility: physiological and molecular avenues for crop improvement. In: Aftab, T., Hakeem, K.R. (Eds). Sustainable Plant Nutrition. *Elsevier*. United States. https://doi.org/10.1016/b978-0-443-18675-2.00009-2.

Santiago M., B.E. & Espinosa, R.M. (2023). Guía para la producción de lixiviado de composta. Desplegable para productores. INIFAP-CIRNE. México.

Sharifi, S., Shi, S., Dong, X., Obaid, H., He, X. & Gu, X. (2023). Variations in nitrogen accumulation and use efficiency in maize differentiate with nitrogen and phosphorus rates and contrasting fertilizer placement methodologies. *Plants*, 12:1-29. https://doi.org/10.3390/plants12223870.

Urban, A., Rogowski, P., Wasilewska-Debowska, W. & Romanowska, E. (2021). Understanding maize response to nitrogen limitation in different light conditions for the improvement of photosynthesis. *Plants*, 10:1-17.

Wang, N., Feng, K.Y., Nan, H.Y., Cong, A.Q., Zhang, T.H. (2023). Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizer ratio on water and nitrogen use efficiency of cotton under water deficit. *Scientia Agricultura Sinica*, 56:1531-1546. https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2023.08.009.

Wang, F., Guo, Y., Li, P., Wu, X., Qiu, H., Yin, W., Zhao, L., Fan, Z., Hu, F., He, W., Fan, H. & Chai, Q. (2025). Organic fertilizer substitution enhances maize yield and quality under reduced irrigation. *Journal of Integrative Agriculture*, 24:1-27. https://doi.org/10.1016/j.jia.2025.05.025.

Wu, P., Liu, F., Chen, G., Wang, J., Huang, F., Cai, T., Zhang, P. & Jia, Z. (2022). Can deep fertilizer application enhance maize productivity by delaying leaf senescence and decreasing nitrate residue levels? *Field Crops Research*, 277:1-16.

Zhou, L., Shen, D., Wang, K., Ming, B., Fang, L., Wang, Z., Sun, L., Liu, J., Zhang, G. & Li, S. (2025). Impact of planting density and nitrogen application on maize source-sink relationships and yield under drip irrigation. *Journal of Agriculture and Food Research*, 21:1-15. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102000.

EFECTO DEL BORO (B) SOBRE EL DESARROLLO INICIAL EN PLÁNTULAS DE TOMATE (*Solanum lycopersicum*)

José Nicolás Beltrán Burboa[1]; Manuel Sandoval Villa[1]; Libia Iris Trejo Téllez[1]

[1] Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco 56264, México.

Correo del autor de correspondencia: beltran.9592@gmail.com

RESUMEN

El boro (B) es uno de los elementos esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas; sin embargo, concentraciones elevadas pueden tener efectos adversos en las diferentes etapas de los cultivos. El tomate es uno de los cultivos hortícolas de mayor importancia económica en el mundo y es la principal hortaliza exportada en México; está clasificado como un cultivo semitolerante al B. En este trabajo se evaluaron diferentes concentraciones de B (0, 10, 20, 30 y 40 mg L^{-1}) disueltas en agua destilada y se aplicaron a semillas del híbrido de tomate MACIZO F1, colocadas sobre papel absorbente en cajas Petri para evaluar su efecto en la germinación y algunas variables de crecimiento en las plántulas durante los primeros 10 días de desarrollo. Los resultados mostraron que las concentraciones de B no afectaron el porcentaje de germinación de las semillas, así como el tiempo medio de germinación (TMG). Por otro lado, la longitud de la raíz mostró diferencias significativas. Las plántulas desarrolladas en la solución de 40 mg L^{-1} de B mostraron una menor longitud en comparación con las plántulas testigo (27.7 mm y 81.2 mm, respectivamente). Asimismo, la longitud del hipocótilo también se vio afectada por los tratamientos, en este caso las plántulas en la solución con 10 mg L^{-1} de B fueron las de mayor longitud (32.05 mm) y la menor longitud correspondió a las plántulas tratadas con 40 mg B L^{-1} (25.9 mm).

PALABRAS CLAVE: *Crecimiento; germinación; toxicidad.*

INTRODUCCIÓN

El tomate es el cultivo hortícola más importante a nivel mundial con 16% de la producción total de hortalizas y es el de mayor exportación en México (SIAP, 2020). En el 2024, el intercambio comercial total de tomate fresco o refrigerado tuvo un valor de 3,162 millones de dólares, con los estados de Sinaloa, Sonora, Jalisco, Guanajuato y Puebla los de mayores ventas a nivel internacional con 1,164, 331, 331, 203 y 160 millones de dólares, respectivamente. Los principales destinos comerciales fueron Estados Unidos, Canadá, Guatemala, Japón y Costa Rica (Secretaría de Economía, 2025).

El boro (B) es un elemento esencial para las plantas vasculares; una de sus principales funciones es mantener la estabilidad de la pared celular. Además, participa en procesos de división celular, síntesis de ácidos nucleicos, transporte de carbohidratos, entre otros (Bose y Tripathi, 1996). Sin embargo, en concentraciones elevadas, pueden ser tóxicas y pueden limitar el crecimiento y desarrollo de los cultivos, así como su productividad. Los

síntomas comunes de la toxicidad por B son la decoloración de las hojas, la reducción en el vigor de la planta, el retraso en el desarrollo y la disminución en el número, tamaño y peso de los frutos (Muntean, 2009). Además, aunque no parece haber síntomas visibles, las plantas sometidas a dosis elevadas de B muestran una disminución en el crecimiento radicular en comparación con aquellas desarrolladas a niveles óptimos de este elemento (Gunes *et al.,* 2006).

Varios autores han destacado el efecto del agua de riego con altas concentraciones de B en zonas áridas de California y el norte de Chile, y se señala que el riego continuo con agua con concentraciones superiores a 4 mg L^{-1} puede producir efectos negativos en especies sensibles como frijol, zanahoria y lechuga (Bañuelos *et al*., 1999). Por otro lado, la toxicidad por B puede afectar al cultivo de tomate y es una problemática agrícola importante que limita la productividad de los cultivos en varias regiones del mundo, las causas de este fenómeno son variadas y van desde el uso de suelos con alto contenido de B o en aquellos cuya fuente de agua de riego contiene altas concentraciones de este elemento, así como el uso excesivo de fertilizantes ricos en B, el uso de lodos provenientes de alcantarillados o deposición de ceniza por la alta actividad geotérmica (Reid, 2010; Landi *et al*., 2012; Princi *et al*., 2016).

La producción de plántulas bajo condiciones de toxicidad de B limita la productividad de los cultivos debido a que las primeras etapas de desarrollo en plantas cultivables son cruciales para su establecimiento y adaptación en el campo, ya sea en suelo o hidroponía. Por lo tanto, en las regiones donde el agua de riego se obtiene de pozos profundos y el contenido de este elemento es elevado, se pueden presentar condiciones inadecuadas para la producción de tomate. Es por ello que en este estudio se propuso evaluar diferentes concentraciones de B en la germinación para determinar su efecto en el desarrollo inicial de las plántulas de tomate.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluó el efecto de la toxicidad de B en la germinación y crecimiento de plántulas de tomate en el laboratorio de Nutrición Vegetal ubicado en el edificio de Edafología del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, en el mes de junio de 2025. Se utilizó como material vegetal semillas del híbrido comercial Macizo F1, de la casa comercial Harris Moran Semillas. Estas fueron germinadas en cuatro concentraciones de B (10, 20, 30 y 40 mg L^{-1}) como ácido bórico (H_3BO_3) y agua destilada como testigo. Se utilizaron cajas de Petri de 90x15 mm a las que se les colocó una hoja recortada de papel absorbente a las cuales se les colocaron un total de diez semillas y cinco mL de la solución correspondiente y se taparon para evitar la evaporación. Con un total de cuatro repeticiones por tratamiento, las 20 unidades experimentales se dejaron en condiciones de laboratorio durante 10 días posteriores a la siembra. Se consideró como germinada aquella semilla cuya radícula tuviera 2 mm de protrusión y se contó diariamente el número de semillas germinadas para determinar el tiempo medio de germinación (TMG) (ISTA, 2018) con la fórmula:

$$TMG = \sum Dn / \sum n$$

Al concluir los 10 días, se tomaron cinco plantas de cada una de las repeticiones para medir la longitud del hipocótilo y las raíces con ayuda de una hija milimétrica. El diseño experimental fue completamente al azar y los análisis estadísticos y comparaciones de medias Tukey se hicieron en el programa de análisis estadísticos SAS 9.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las concentraciones de B no tuvieron efecto significativo sobre el porcentaje de germinación total en las semillas de tomate después de 10 días de iniciar el experimento. De la misma forma, los tratamientos no tuvieron efecto sobre el TMG (Figura 1). Por otro lado, la longitud del hipocótilo se vio afectada por las altas concentraciones de B. El tratamiento con 10 mg L^{-1} fue el de mayor longitud (32.05 mm) y el tratamiento con 40 mg B L^{-1} el de menor longitud (25.9 mm). La longitud de la raíz también se vio afectada de forma significativa por las concentraciones de B. El tratamiento de 40 mg L^{-1} mostró mayor efecto en la reducción del crecimiento en comparación con el testigo (29.75 y 81.2 mm, respectivamente; Figura 2).

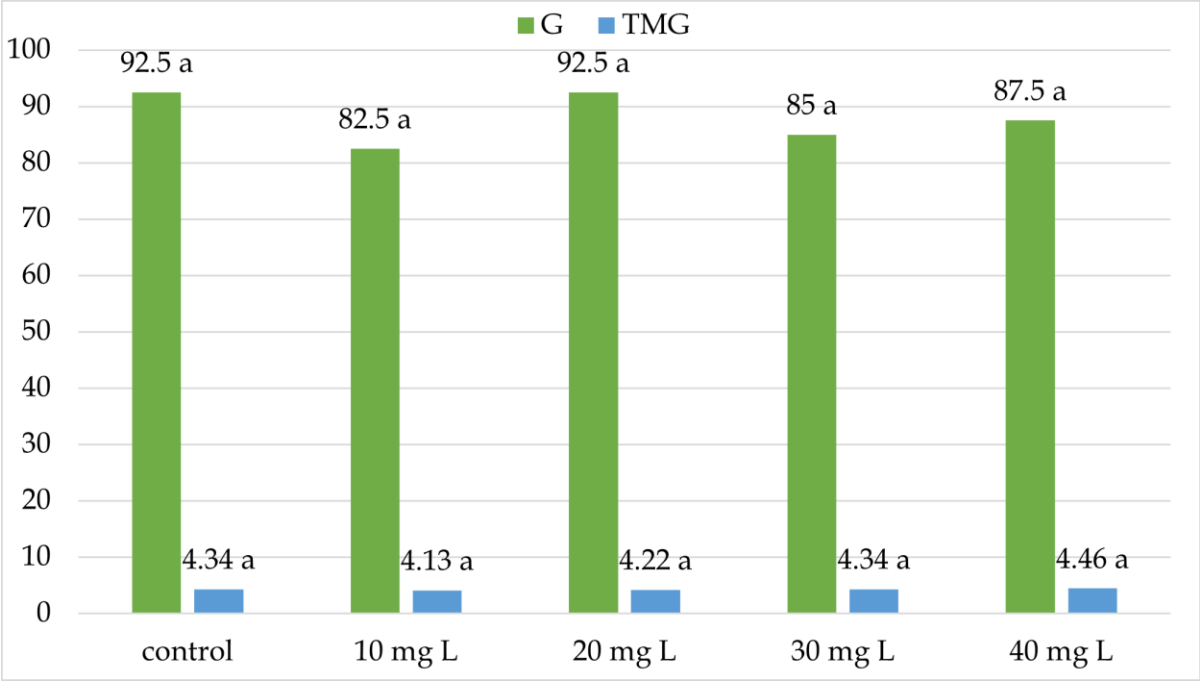


Figura 1. Germinación (G) total y tiempo medio de germinación (TMG) de semillas de tomate híbrido Macizo F1 a los 10 días después de la siembra.

Los resultados obtenidos en este ensayo coinciden con los reportados por Kaya *et al*. (2023), donde evaluaron diferentes concentraciones de B (H_3BO_3; 2, 4, 8, 16, 30, 60 y 90 mg L^{-1}) en la germinación de semillas de soya. Los tratamientos evaluados no influyeron en el porcentaje de germinación de las semillas; sin embargo, en este mismo estudio, las concentraciones de B influyeron positivamente en el TMG. Los tratamientos de 30 y 60 mg L^{-1} mostraron una germinación más acelerada en comparación con el control. Por otro lado, un estudio realizado por Ashagre *et al*. (2014), reportó que el incremento en las concentraciones de B (0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0 y 16.0 mg L^{-1}) en cártamo influyeron de

forma negativa en el crecimiento inicial del tallo y raíces; y disminuyeron significativamente los valores de ambas variables conforme se incrementaron las dosis en los tratamientos, similar a los resultados obtenidos en el presente trabajo.

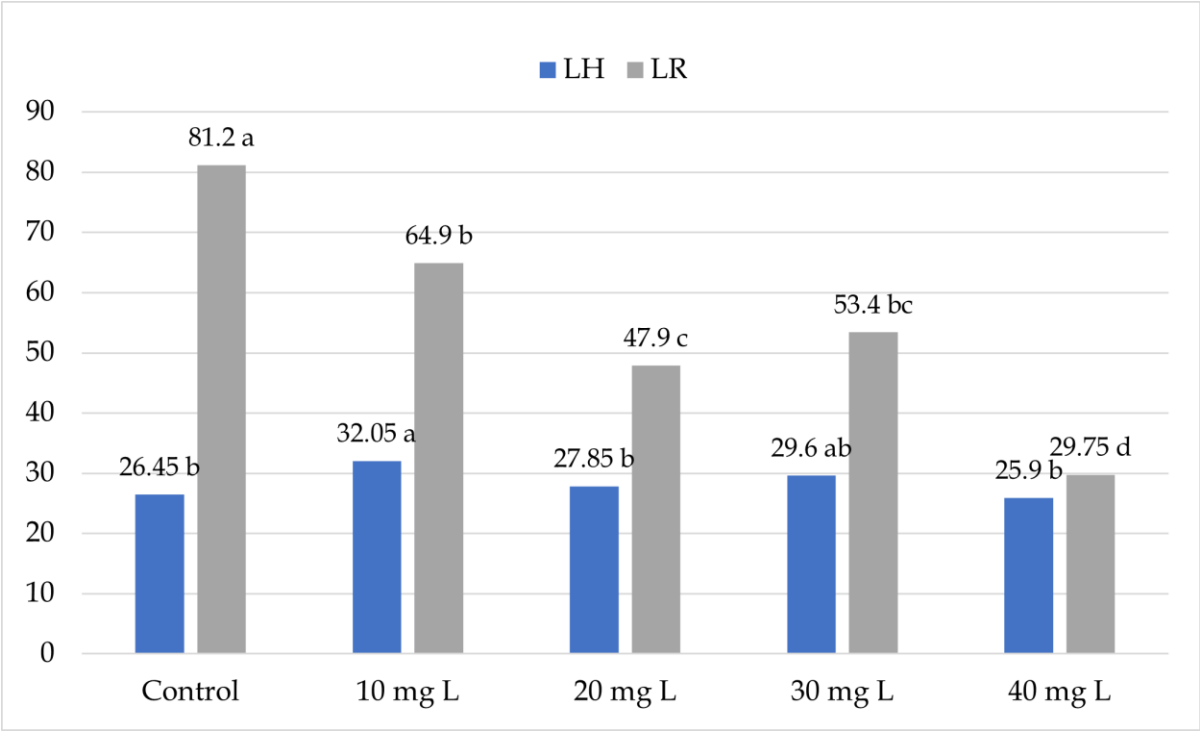


Figura 2. Longitud de hipocótilo (LH) y longitud de raíz (LR) en plántulas de tomate híbrido Macizo F1 a los 10 días después de la siembra.

La toxicidad de B se asocia con una división celular anormal en la zona meristemática de la raíz (Ghanati *et al*., 2005; Donghua *et al.,* 2000), demostraron que la inhibición del crecimiento en las raíces de soya por exceso de B se dio por la formación de una hipodermis y una deposición de suberina en las paredes celulares corticales. Estos mismos autores sugirieron que este fenómeno es una estrategia de la planta por la cual se obstaculiza el movimiento radial de agua y B a los tejidos conductores. En otro estudio, en trigo, Reid *et al*. (2004) encontraron que la inhibición rápida del crecimiento radicular ocurrió cuando las dosis elevadas de B se aplicaron en el ápice de la raíz, pero no se inhibió su desarrollo cuando se aplicó en zonas maduras.

CONCLUSIONES

El porcentaje de germinación de las semillas de tomate no se afecta por el incremento de las concentraciones de B en la solución acuosa. En este mismo sentido, el tiempo medio de germinación no se afectó por las altas concentraciones de B. Sin embargo, el aumento de las dosis de B (> 10 mg L^{-1}) afecta de forma significativa el crecimiento de las raíces y dosis mayores a 30 mg L^{-1} disminuyen la longitud del hipocótilo durante los primeros días de desarrollo de las plántulas.

BIBLIOGRAFÍA

Donghua, L., Jiang, W., Zhang, L., and Lufang, L.I. (2000). Effects of boron ions on root growth and cell division of broadbean (*Vicia faba* L.). *Israel Journal of Plant Sciences*, 48: 47-51.

Bose, U.S., and Tripathi, S.K. (1996). Effect of micronutrients on growth, yield and quality of tomato cv. Pusa Ruby in MP. *Crop Research Hisar*, 12, 61-64.

Kaya, M.D., Ergin, N., and Harmancı, P. (2023). Effects of boron forms and doses on germination in sunflower, soybean, and opium poppy seeds. *Journal of Agricultural Production*, 4: 1-6. https://doi.org/10.56430/japro.1217929.

Ashagre, H., Hamza, I.A., Fita, U., and Estifanos, E. (2014). Boron toxicity on seed germination and seedling growth of safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Herald Journal of Agriculture and Food Science Research*, 3: 1-6. http://www.heraldjournals.org/hjafsr/archive.htm

SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2020). https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119.

Secretaría de Economía. (2025). Tomatoes, fresh or chilled. DataMéxico. Disponible en: https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/tomatoes-fresh-or-chilled. Consultado: 17 jul. 2025.

Muntean, D.W. (2009). Boron, the overlooked essential element. Soil and Plant Laboratory, Bellevue, WA 98009. P.O Box 1648. http://www.soilandplantlaboratory.com/pdf/articles/BoronOverlookedEssential.pdf

Gunes, A., Soylemezoglu, G., Inal, A., Bagci, E.G., Coban, S., and Sahin, O. (2006). Antioxidant and stomatal responses of grapevine (*Vitis vinifera* L.) to boron toxicity. *Scientia Horticulturae,* 110: 279-284.

Bañuelos, G.S., Ajwa, H.A., Cáceres, L., and Dyer, D. (1999). Diferencias de acumulación y tolerancia a altas concentraciones de boro de especies agrícolas en el norte de Chile y California, Estados Unidos. *Idesia,* 17: 31-40.

Reid, R. (2010). Can we really increase yields by making crop plants tolerant to boron toxicity? *Plant Science,* 178: 9-11.

Landi, M., Degl'Innocenti, E., Pardossi, A., and Guidi, L. (2012). Antioxidant and photosynthetic responses in plants under boron toxicity: a review. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences,* 7: 255-270.

Princi, M.P., Lupini, A., Araniti, F., Longo, C., Mauceri, A., Sunseri, F., and Abenavoli, M.R. (2016). Boron toxicity and tolerance in plants: Recent advances and future perspectives. *Plant metal Interaction*, 115-147.

Ghanati, F., Morita, A., and Yokota, H. (2005). Deposition of suberin in roots of soybean induced by excess boron. *Plant Science,* 168: 397-405.

Reid, R.J., Hayes, J.E., Post, A., Stangoulis, J.R., and Graham, R.D. (2004). A critical analysis of the causes of boron toxicity in plants. *Plant, Cell & Environment,* 27: 1405-1414.

EFECTO DE LA COMPOSTA SOBRE VARIABLES DE CRECIMIENTO EN MAÍZ NATIVO SAN PABLEÑO BLANCO

Maricruz Pool Moo[1]; Pedro Salvador Morales[1]; Mónica Beatriz López Hernández[1]; Gustavo Enrique Mendoza Arroyo[1]; Enrique Arcocha Gómez[1]; Jorge Rodolfo Canul Solís[2].

[1] Instituto Tecnológico de Chiná. C.P. 24520. Chiná, Campeche. México.
[2] Instituto Tecnológico de Tizimín. C.P. 97702. Tizimín, Yucatán. México.

Correo del autor de correspondencia: pedro.sm@china.tecnm.mx

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue evaluar la respuesta de variables de crecimiento y producción de biomasa por efecto de la adición de composta en un cultivo de maíz nativo San Pableño blanco. El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar, se evaluaron cuatro niveles de composta T1 = 5, T2 = 10, T3 = 20 y T4 = 30 Mg h^{-1} y un testigo sin composta (T0), las variables de estudio fueron incremento de la altura de la planta (m), el diámetro de tallo (cm), número de hojas, biomasa de tallo y (hojas +mazorca) (g). Los resultados muestran que a los 25 dds (días después de la siembra) el tratamiento T2 obtuvo la mayor altura y a los 40 días los tratamientos T3 y T4, con respecto al diámetro de tallos, las diferencias ocurrieron a los primeros 25 dds donde los tratamientos T2, T3 y T4 fueron los más sobresalientes. La variable número de hoja muestra diferencias a los 25 dds, obteniendo los valores más altos el tratamiento T2 y T4, a los 40 dds el T4 fue superior. La biomasa de tallo a los 90 dds mostró una diferencia significativa en todos los tratamientos comparados con el testigo; la hoja + mazorca fue mayor en el T4. La aplicación de la composta beneficia el crecimiento y la acumulación de biomasa en plantas de maíz tal como se muestra en este estudio.

PALABRAS CLAVE: *Niveles de composta; características químicas de la composta; variables de crecimiento; maíz nativo.*

INTRODUCCIÓN

Para incrementar los rendimientos del cultivo de maíz se usa principalmente sales fertilizantes, sin embargo, su uso irracional ha deteriorado el suelo incrementando su salinidad, así como el agotamiento de la fertilidad del suelo por perdida de la materia orgánica, esto ha provocado una dependencia de los mencionados fertilizantes por parte de los productores (Beltrán *et al*., 2019). Una de las alternativas para disminuir el uso de fertilizantes es la aplicación de composta; este producto se obtiene de la descomposición de los residuos orgánicos en condiciones aeróbicas (Gallardo, 2017). Se ha demostrado que cuando se aplica composta al suelo, este aumenta la capacidad de retención de humedad, se mejora la estructura del suelo y facilita la disponibilidad de nutrimentos para las plantas (Sayara, 2020). El uso de la composta ha cobrado importancia por su eficiente reciclaje de nutrientes ayudando al crecimiento de las plantas y restituyendo los nutrientes que se extraen durante el ciclo del cultivo (Fortis *et al*., 2009). En una

investigación realizada por Martinez *et al*. (2001) comparó fertilización química y composta sobre el rendimiento de grano en maíz, sus resultados indican que cuando se aplica 20 y 30 Mg h-1 de composta se obtienen resultados similares a los que se producen con fertilizante convencional. En este sentido en el Estado de Campeche la producción de maíz es una de las actividades agrícolas de mayor relevancia, en las visitas a los campos agrícolas hemos podido observar que los productores no cuentan con conocimiento sobre dosis correctas de aplicación de fertilizantes solo se basan en medidas que ellos consideran son suficientes, actualmente quienes participan en programas como sembrando vida están aplicando composta sin un previo análisis de suelo y mucho menos determinaciones químicas en la composta. Es por lo anterior que el objetivo del presente trabajo se centra en evaluar el efecto de la composta sobre variables agronómicas y producción de biomasa en un cultivo de maíz nativo San Pableño blanco.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del área de estudio. El estudio se realizó en el campo experimental del Instituto Tecnológico de Chiná, rancho Xamantún el cual se encuentra entre las coordenadas geográficas 19° 43' 15'' N y Latitud -90° 25' 05'' O, presenta una altitud de 50 msnm, una temperatura media anual de 27°, un clima cálido subhúmedo con lluvias de hasta 800 mm anuales (INEGI, 2021).

Elaboración y composición química de la composta: La preparación de la composta fue de acuerdo con el manual práctico para la elaboración de bioinsumos (INIFAP, 2022). Los residuos orgánicos utilizados fueron: 25 costales de 50 kilogramos de zacate (Brachiaria brizantha CV. Marandú) seco finamente picado, 20 costales de 50 kilogramos de estiércol seco de ganado bovino, 30 costales de 50 kilogramos de hojas frescas de zalam (*Lysiloma latisiliquum* L. Benth), 5 costales de 50 kilogramos de tierra de monte, 35 kilos de ceniza de madera. Se emplearon 92 días para la maduración de la composta, las características químicas fué analizada por la empresa FERTILAB: pH 7.7, conductividad eléctrica (CE) 9.9 dS m^{-1}, materia orgánica 31.8%, macronutrientes: nitrógeno 1.73%, fosforo 0.43%, potasio 1.24%, Calcio 7.82%, magnesio 0.54%, azufre 0.32%, sodio 0.16%, micronutrientes: hierro 2 pm, manganeso 982 pm, zinc 131 pm, cobre 28 pm, boro 20 pm.

Establecimiento del experimento. El experimento se estableció en la tercera semana de septiembre del 2024, bajo un diseño de bloques completos al azar con cinco tratamientos y tres repeticiones, los niveles de composta evaluados fueron: T1 = 5, T2 = 10, T3 = 20, T4 = 30 Mg ha^{-1} y T0 (testigo absoluto sin composta). Cada unidad experimental (bloque) contó con cinco parcelas de un metro de ancho por tres metros de largo, para su preparación, primero se hizo un pase de rastra, seguidamente se adicionó la composta y con la ayuda de un azadón se integró al suelo dejándola descansar por 15 días, transcurrido este tiempo, se sembraron 15 plantas de maíz nativo San Pableño blanco por parcela a una distancia de 20 cm entre cada una y un metro de distancia entre hileras para una densidad de 50, 000.00 plantas por hectárea.

Variables evaluadas. Las variables evaluadas en la planta del maíz fueron altura de la planta (AP) en (cm), diámetro de tallo (DT) en (cm) y número de hojas (NH) realizándose cinco mediciones hasta los 80 días de su ciclo, de igual manera se determinó la producción

de biomasa por lo que transcurrido 90 días después de su siembra, las plantas fueron cosechadas y fraccionadas en tallos y (hojas + mazorca), cada fracción fue puesta en bolsas de papel estraza etiquetada y secada en una estufa de aire forzada a 70°C hasta peso constante.

Análisis estadísticos. Los datos fueron sometidos a un análisis de varianza y prueba de medias por Tukey con un nivel de significancia ($P<0.05$), utilizando el programa estadístico STADGRAPHIC® centurión XVI (StatPoint Technologies, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La altura del maíz alcanzó los 2.2 m en promedio de todos los tratamientos a los 80 días después de la siembra (dds), el análisis de varianza ($p < 0.05$) en la primera medición mostró que el tratamiento T2 fue el que presentó el valor más alto y a los 40 días después de la siembra (dds) los tratamientos T3 y T4 mostraron una mayor altura. El crecimiento en diámetro mostró diferencias en los primeros 25 dds siendo los tratamientos T2, T3 y T4 los más sobresalientes, no así para las demás fechas de toma de datos las cuales se comportan estadísticamente iguales. La variable número de hoja muestra diferencias en la primera medición, obteniendo los valores más altos el tratamiento T2 yT4, a los 39 y 43 dds el T4 fue superior a los demás tratamientos, en las siguientes mediciones estas variables de crecimiento no mostraron diferencias significativas entre tratamiento, sin embargo, de manera general puede observarse que en el tratamiento T3 y T4 la planta de maíz tiene una mejor respuesta (Cuadro 1).

Similar comportamiento observó (Escalona *et al*., 2021), quienes aplicando 5 Mg h^{-1} de contenido ruminal obtuvieron respuestas positivas de las variables altura y numero de hoja a los 33 días de su evaluación en maíz hibrido, estos autores atribuyen este comportamiento a que el cultivo de maíz se relaciona positivamente para estas variables con los contenidos de nitrógeno en el suelo. Escobar (2013), encontró que la composta tiene efectos muy semejantes al fertilizante químico sobre las variables de crecimiento en el cultivo de maíz, además menciona que los efectos de la composta ocurren principalmente en el periodo vegetativo.

Con respecto a la producción de biomasa, los mayores valores medios ocurren cuando se aplican 20 y 30 Mg h^{-1} de composta. La variable tallo mostró una diferencia significativa en todos los tratamientos comparados con el testigo, la hoja + mazorca fue mayor en el T4 (Cuadro 2).

A este respecto Donoso y Rojas (2008) encontraron resultados similares al adicionar composta dado que la biomasa total en tallo fue superior comparada con los demás tratamientos, en concordancia con lo obtenido en esta investigación. Por otro lado, (Martínez *et al*., 2021) sostienen que la adición de composta produce una diferencia significativa en raíz, tallo y hojas, reforzado por (Galeote *et al*., 2022), quienes demostraron que la adición de composta es capaz de producir una diferencia significativa en raíz, tallos y hojas, coincidiendo con este estudio en las últimas dos variables.

Cuadro 1. Valores medios del diámetro de tallo, número de hojas y altura total a los 80 días después de la siembra.

Variable	Mg h^{-1} de composta	Días después de la siembra (dds)				
		25	40	55	70	80
Altura total (m)	30	0.59ab	1.48b	1.92a	2.19a	2.27a
	20	0.53ab	1.45b	1.87a	2.11a	2.12a
	10	0.61b	1.39ab	1.82a	2.14a	2.13a
	5	0.5ab	1.43ab	1.85a	2.34a	2.31a
	0	0.44a	1.19a	1.69a	2.02a	2.04a
EEM		0.03	0.06	0.07	0.08	0.08
Diámetro de tallo (cm)	30	8.45b	8.84a	22.3a	23.9a	23.99a
	20	8.43b	8.74a	21.5a	23.48a	23.99a
	10	8.7b	8.93a	21.66a	23.29a	23.99a
	5	8.14ab	8.48a	21.75a	23.21a	23.68a
	0	7.37a	8.2a	18a	21.37a	21.96a
EEM		0.25	0.28	1.12	0.83	0.84
No. hoja	30	8.3b	10.9b	12.9a	15.5a	15.8a
	20	8ab	10.3ab	13.3a	15.5a	15.6a
	10	8.3b	10.1ab	13.1a	15a	15.1a
	5	7.5a	9.6a	12.3a	14.9a	14.9a
	0	7.8ab	9.9a	12.3a	15.4a	15.4a
EEM		0.24	0.28	0.43	0.22	0.19

Cuadro 2. Producción de biomasa de tallo y (hoja + mazorca) a los 90 días después de la siembra.

Peso seco (g) planta	Mg h^{-1} de composta					EEM
	30	20	10	5	0	
Tallo	86.2a	76.2a	70.2a	69.9a	48.3b	4.7
Hoja + mazorca	117.9a	106.2ab	86.9ab	84.7ab	74.1b	9.2
Total	204.1	182.4	157.1	154.6	122.4	

Letras diferentes sugieren diferencias significativas, $P < 0.05$, EEM = error estándar de la media.

CONCLUSIONES

En este estudio se demuestra que la composta influye de manera positiva sobre las variables de crecimiento del maíz en los primeros 40 días después de la siembra ya que es en este periodo donde hay una respuesta estadística clara sobre las variables altura de la planta, diámetro de tallo y número de hojas, de igual manera se demostró los beneficios de la composta sobre la acumulación de biomasa a los 90 días después de la siembra, finalmente, el cultivo de maíz San Pableño blanco responde positivamente a la aplicación de 20 y 30 Mg h^{-1} de composta.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la SECIHTI por la beca otorgada a la estudiante del programa de Maestría en Ciencias en Agroecosistemas Sostenibles, Maricruz Pool Moo.

BIBLIOGRAFÍA

Beltrán-Morales, F. A., A. Nieto-Garibay, J. S. A. Murillo-Chollet, F. H. Ruiz-Espinoza, E. Troyo-Dieguez, J. A. Alcala-Jauregui, B. & Murillo-Amador. (2019). Contenido inorgánico de nitrógeno, fósforo y potasio de abonos de origen natural para su uso en agricultura orgánica. *Terra Latinoamericana,* 37: 371-378. DOI: https://doi.org/10.28940/terra.v37i4.520.

Donoso, E., Lobos, G. A. & Rojas, N. (2008). Efecto de Trichoderma harzianum y compost sobre el crecimiento de plántulas de Pinus radiata en vivero. *Bosque* (Valdivia), 29(1), 52-57. http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002008000100006.

Escalona-Sánchez, A., Gavilanez-Buñay, T., Francisco-Yépez, A. & Ramírez-Guerrero, H. O. (2021). Uso de enmiendas en la producción de maíz para ensilaje con riego orgánico mineral. *Agronomía Costarricense*, 45(1), 177-192. https://dx.doi.org/10.15517/rac.v45i1.45769.

Escobar-Escobar, N., Mora-Delgado, J.A.I.R.O. & Romero Jola, N. (2013). Respuesta agronómica de Zea mays L. y Phaseolus vulgaris L. a la fertilización con compost. *Luna Azul,* (37), 18-29.

Fortis-Hernández, M., Leos-Rodríguez, J.A., Preciado-Rangel, P., Orona-Castillo, I., García-Salazar, J.A., García-Hernández, J.L. & Orozco-Vidal, J. A. (2009). Aplicación de abonos orgánicos en la producción de maíz forrajero con riego por goteo. *Terra latinoamericana,* 27(4), 329-336.

Galeote-Cid,G., Cano-Ríos, P., Ramírez-Ibarra, J.A., Nava-Camberos, U., Reyes-Carrillo, J.L. & Cervantes-Vázquez, M. A. (2022). Comportamiento del chile Huacle (Capsicum annuum L.) con aplicación de compost y Azospirillum sp. en invernadero. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-12. e828. https://doi.org /10.28940 /terra.v40i0.828.

Gallardo L., J.F. (2017). La materia orgánica del suelo. Residuos orgánicos, humus, compostaje y captura de carbono. Universidad Autónoma Chapingo.

INEGI. (2021). Anuario Estadístico y Geográfico de Campeche. Recuperado el 31 de agosto de 2025 de https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_04.pdf.

INIFAP. (2022). Manuales prácticos para la elaboración de bioinsumos: composta. Estrategia de Acompañamiento Técnico. https://www.gob.mx/cms/ uploads/ attachment/file/737324/9_Composta.pdf.

Martínez, J. D. L., Estrada, A. D., Rubin, E. M. & Cepeda, R. D. V. (2001). Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. *Terra latinoamericana,* 19(4), 293-299.

Martínez-Durán, Y., Aquino-Bolaños, E. N., Lara-Capistrán, L., Alemán-Chávez, I. & Zulueta-Rodríguez, R. (2021). Efecto residual del dióxido de silicio y composta en el cultivo de *Phaseolus vulgaris* cv. 'strike' con acolchado plástico. *RINDERESU,* 5(2).

Sayara, T., Basheer-Salimia, R., Hawamde, F. & Sánchez, A. (2020). Recycling of organic wastes through composting: Process performance and compost application in agriculture. *Agronomy,* 10(11), 1838. https://doi.org/10.3390/agronomy10111838.

EFFECTOS DE LA REGENERACIÓN NATURAL POST-DEGRADACIÓN EN LAS PROPIEDADES Y MICROBIOMA DE SUELOS FORESTALES DE LA PRECORDILLERA ANDINA

Juan Ortiz Contla[1]; Marcelo Panichini Panichini[2]; Pablo Neira Vidal[3]; Carlos Henríquez Castillo[4]; Rocío Elizabeth Gallardo Jara[1]; Rodrigo Nicolás Rodríguez Quiroz[5]; Ana Mutis Tejos[6]; Camila Ramos Carrera[1,7]; Winfred Espejo Contreras[1]; Ramiro Puc Kauil[8]; Erik Manuel Zagal Venegas[1]; Neal Stolpe Lau[1]; Mauricio Iván Schoebitz Cid[1]; Marco Sandoval Estrada[1]; Francis Dube Laplante[9]

[1] Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción, Vicente Méndez 595, Chillán 3812120, Región de Ñuble, Chile.
[2] Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Estación Carillanca, km 10, Camino a Cajón, Vilcún 4880000, La Araucanía, Chile.
[3] Institut de Recerca de la Biodiversitat (IRBio), Universitat de Barcelona, 08028 Barcelona, España
[4] Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad del Alba, Av. Ejército Libertador 171, Santiago 8320000, Santiago, Chile.
[5] Laboratorio de Investigación en Biocontrol, Universidad de La Frontera, Temuco 4811230, La Araucanía, Chile.
[6] Departamento de Ciencias Químicas y Recursos Naturales, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad de La Frontera, Temuco 4811230, La Araucanía, Chile.
[7] Programa de Doctorado en Ciencias de la Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción, Vicente Méndez, 595, Chillan 3812120, Región de Ñuble, Chile.
[8] Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza. Av. Tecnológico, S/N, Col. El Huasteco, CP. 73049, Venustiano Carranza, Puebla, México.
[9] Departamento de Silvicultura, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Victoria 631, Casilla 160-C, Concepción 4030000, Región del Biobío, Chile.

Correo del autor de correspondencia: fdube@udec.cl

RESUMEN

Chile es un importante reservorio genético que alberga ~50% de la superficie boscosa templada del Hemisferio Sur. No obstante, ha sido sujeta a severos procesos de degradación, generando mosaicos de regeneración natural sin manejos asociados. En consecuencia, se propuso conocer la capacidad de prestación de servicios ecosistémicos estudiando veintidós propiedades del suelo (0-5 y 5-20 cm) y el microbioma asociado, en dos bosques contiguos de *Nothofagus* con registros de perturbación similares, pero en etapas de regeneración contrastantes de 5 y 50 años ($B_{QUE}5$ y $B_{QUE}50$, respectivamente). Los resultados mostraron 93 interacciones entre las propiedades analizadas ($r \geq 0.80$), sin embargo, no se presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en alguna de las propiedades analizadas, exceptuando la velocidad de infiltración +27.97%, resistencia a la penetración (-23%), carbono orgánico (COS) (+5.64%) y saturación de Al (+5.64%) relacionado con $B_{QUE}50$, observándose consistentemente 0-5 > 5-20 cm valores más adecuados. El secuestro de COS estimado fue de 4.2 ± 0.5 y 2.7 ± 0.2 Mg ($B_{QUE}5$, $B_{QUE}50$), sin cambios estructurales de las comunidades microbianas, representando una alta resiliencia de los suelos volcánicos en virtud de su capacidad equivalente de prestación de servicios ecosistémicos.

PALABRAS CLAVE: *Andisols, bosques secundarios; calidad del suelo; regeneración natural*.

INTRODUCCIÓN

El COS controla diversos y multi-escalares procesos ecosistémicos (i.e. regulación hídrica y ciclo de nutrientes), que son mediados principalmente por microorganismos (Chaplin-Kramer *et al.,* 2022). Sin embargo, las actividades humanas de sobreutilización de los recursos naturales (i.e. deforestación) han generado una pérdida histórica de ~9% del COS, asociada a efectos como la degradación y el calentamiento global, por lo que distintos esfuerzos internacionales se centran en su restitución (Don *et al.,* 2024). Tal escenario es crítico en Chile, donde se desarrolla 79.5% de la masa boscosa templada del Hemisferio Sur a nivel continental (33-55° Sur, 14,41 Mg ha^{-1}), predominantemente de *Nothofagus spp*. (Miranda *et al.,* 2017), que ha sido altamente intervenida y degradada con fines productivos durante las décadas pasadas, debido en parte a las condiciones físico-geográficas, donde la agricultura en laderas es ampliamente distribuida y los suelos volcánicos representan hasta el 60% de la tierra cultivable aprovechada (Donoso et al., 2022). En respuesta, se ha implementado un marco con políticas agro-silvícolas sostenibles que en suma representan el 23% de la superficie forestal protegida de Sudamérica, donde vastas superficies se han regenerado naturalmente. Lo anterior sugiere la necesidad de evaluar el estado actual de los suelos, debido a su inherente valor como soporte de ecosistemas de alto valor natural y a su capacidad para secuestrar COS (Nanzyo, 2002). El objetivo de este estudio fue determinar la capacidad de prestación de servicios ecosistémicos del suelo en dos bosques nativos secundarios de Nothofagus obliqua en distintos estadíos postdegradación a través de su status de fertilidad, capacidades hídricas y de secuestro de carbono, así como la estructura de los microbiomas asociados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio. Ambos sitios BQUE5 (37°03′31.87″ S, 71°38′21.76″ W), BQUE50 (37°4′43.01″ S, 71°39′25.32″ W), se ubican en La Reserva Natural "Nevados de Chillán-Laguna del Laja". De cada sitio se analizaron 3 lotes de 1.33 ha, con muestras compuestas a 0-5 y 5-20 cm, para un total de 36 muestras analíticas. Los suelos, correspondientes a la serie "Santa Bárbara", se clasificaron como Typic Haploxerands. Status de fertilidad. Todos los ensayos químicos pH, NH4+, NO3−, P, K, Ca, Mg, S, CICE, Al intercambiable y saturación de Al, fueron analizados de acuerdo a Sadzawka (2006), mientras que el COS y N por Wright y Bailey (2001).

Estabilidad y capacidad hídrica. Se evaluaron la: i) densidad aparente (DA) por el método de cilindro (211 cm3), ii) densidad real o de partícula (DP) a través de un picnómetro Pobel-Gay-Lussac, iii) porosidad total (POR), a través de la fórmula POR=[1−(DA/DP)] ×100, iv) la velocidad de infiltración con un infiltrómetro Mini Disk S (Pullman, WA, USA) estimando el valor K por el método de Zhang (1997), v) capacidad de retención de humedad utilizando el método de conos sellados 12 h-drenados (Zagal

et al., 2003), vi) estabilidad de agregados por el método tamizado-inmersión-secado de Kemper y Rosenau (2018) y el grado de compacidad en transectos longitudinales / zig-zag de 60 puntos para asegurar la representatividad, utilizando un penetrómetro Soil Compaction Tester Dickey–John (Auburn, IL, USA). Almacenamiento de COS. Los contenidos de COS se determinaron mediante la fórmula: COS almacenado = H ×DA×COS×100; donde: H fue la profundidad del suelo (cm); DA densidad aparente (g cm^{-3}); y COS el contenido de C total (g kg^{-1}).

Los resultados fueron comparados con reportes previos para cada sitio, lo que permitió establecer las diferencias temporales, que se dividieron entre el número de años entre observaciones para estimar un promedio de secuestro / almacenamiento de C anual. Estructura del microbioma. Para la extracción de ADN se utilizó el kit Macherey-Nagel y la concentración se midió mediante un NanoDrop™ 3300 (Brody y Kern, 2004). Luego de combinar, liofilizar y almacenar los triplicados, se utilizó la tecnología Fluidigm para combinar los primers F515 y 806R (Bacterias), Euk1391f y EukBr (Eucariotas) e ITS3 e ITS4 (Hongos). Posteriormente se realizó una corrida de secuenciación Illumina HiSeq2000 (2 × 250) y para el procesamiento de datos resultantes, se utilizó el paquete dada2 (v1.11.3) en R (v3.4.4) bajo el pipeline estándar Mothur (filtrado de secuencias de baja calidad y ambiguas), eliminación de quimeras con chimera. vsearch y ensamblaje de lecturas con make.contigs. Para la clasificación taxonómica se utilizaron las bases de datos: GTDB (release 202) para bacterias, PR2v5 para eucariotas y UNITE ITS (v209) en el caso de hongos.

El análisis de comunidades (diversidad alfa y beta) se realizó con el paquete microeco en R y la abundancia relativa de ASVs. Finalmente, para el perfil funcional se usó FAPROTAX y, para las correlaciones funciones microbianas-variables ambientales, el método de correlación de Spearman. Análisis estadísticos. Con el fin de la variabilidad de las propiedades físicas, químicas y microbianas e identificar los patrones de recuperación de los suelos de BQUE5 y BQUE50 en las profundidades consideradas, se realizaron el análisis Kruskal-Wallis debido a la distribución no normal de los datos, así como uno de correlación, con un nivel de significancia $p < 0,05$, utilizando el software estadístico RStudio (V4.1.0, RCore Team 2021) y «ARTool» (Kay *et al.*, 2021). En el caso de la abundancia de los taxones, igualmente se empleó un análisis no paramétrico y del mismo modo, cuando se encontraron diferencias significativas, se realizaron comparaciones por pares utilizando la prueba de Dunn con corrección de Bonferroni para controlar las pruebas múltiples, garantizando una inferencia estadística sólida al tiempo que tiene en cuenta las características de distribución de los datos de abundancia microbiana.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades relacionadas con la estabilidad y capacidad hídrica no mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$), excepto una mayor capacidad de infiltración +4.6 cm $día^{-1}$) y menor grado de compactación (-66 psi) para el BQUE50. En relación al status de fertilidad, se encontraron diferencias entre condiciones y profundidades de pH, N, Al intercambiable, NO_3^-, Ca^{2+}, K^+, S, CICE, C:N, NH_4^+, P^+ y Mg^{2+}, sin embargo, al considerar

la profundidad total, únicamente se observaron mayores contenidos de NO_3^- (31.17%), Ca^{2+} (46.33%) y CICE (22.87%) en BQUE5, ello debido probablemente a la alta densidad-demanda y estadío del sotobosque dominado por *Chusquea sp.* en BQUE50. El Al^{3+} tanto intercambiable como en saturación fue menor en las profundidades inferiores consideradas, lo que podría asociarse a menores contenidos de COS, capaz de estabilizarlo a través de asociaciones órgano-minerales. Se estimaron además variaciones en los contenidos (10.60±0.98 y 88±0.25%) y capacidades de secuestro de C de (+4.23 y +2.75 Mg C ha año^{-1}), para BQUE50 y BQUE5, respectivamente, donde en el segundo caso, hubo un enriquecimiento importante de C pirogénico. Luego del análisis de correlación entre las variables, se observaron 93 interacciones ($r \geq 0.80$), destacándose la influencia del pH, que se relacionó con nueve propiedades, entre ellas su relación inversamente proporcional con la disponibilidad y saturación de Al (r=98 y 89), mientras que el COS se correlacionó con la disponibilidad de N (r=98) y si influencia en los contenidos de nutrientes como P^+, K^+, Mg^{2+}, en valores cercanos a r=80. Con respecto a la composición del microbioma, se determinó que, para la comunidad bacteriana, Alphaproteobacteria y Gammaproteobacteria fueron abundantes en todos los casos, mientras que Acidobacteria prevaleció particularmente en BQUE50, promoviéndose en general procesos de fijación de N, ciclado de S (sulfito-respiración, reducción de sulfato) y estabilización/secuestro de C, generando en conjunto redundancia funcional-estabilidad, claves para la recuperación del ecosistema. Para BQUE5, la mayor presencia de Bacilli junto con Thermoleophilia, se asoció a procesos de adaptación a condiciones adversas, fermentación y quimioheterótrofa aeróbica, lo que sugiere condiciones anaeróbicas asociadas a la compactación. Nuestros resultados coinciden con Navarrete *et al.* (2023), quienes estudiaron suelos cercanos y observaron una composición de la comunidad bacteriana de 45.35, 20.73, 12.59 y 7.32 % para Proteobacteria, Acidobacteria, Actinobacteria y Bacteroidetes, respectivamente. En relación con la comunidad fungi, en BQUE50 dominó Ascomycota 74% y Basidiomycota 25%, aunque la presencia de saprófitos Agaricomycetes y Leotiomycetes, se asocia a una mayor capacidad de ciclado de nutrientes y estabilidad ecosistémica. En el caso de BQUE5, también dominaron Ascomycota 54% y Basidiomycota 45%, aunque se apreció también un incremento de Dothideomycetes, relacionados con alteración de la MOS y estrés nutricional, así como una transición desde hongos patógenos a micorrízicos, reflejando estrés vegetal. Finalmente, cambios en las abundancias Ascomycota/Basidiomycota, tienen implicaciones ecológicas importantes como la persistencia de MOS.

CONCLUSIONES

El estudio reveló propiedades-capacidades ambientales análogas de Andosoles sometidos previamente a severa degradación, aun cuando ello ocurriese con ~45 años de diferencia. Los factores relacionados con tal proximidad y resiliencia edáfica se relacionaron estrechamente con las propiedades ándicas inherentes y dominantes, reflejadas en valores característicos de P, COS, DA y alta POR, condicionando los servicios ecosistémicos, status de fertilidad y capacidad hídrica. En tanto que, para almacenamiento de COS y microbioma, existen tres factores concomitantes: dominancia

de *Chusquea sp*. en BQUE50 generando dinamismo del COS, aunque limitando el restablecimiento del sotobosque originario. En tanto que el material pirogénico producto de quemas y actividades agrícolas condicionó BQUE5, apreciándose algunos efectos residuales favorables en el status de fertilidad con respecto a BQUE5, aunque una menor capacidad generalizada con respecto a BQUE5. Es recomendable realizar actividades asociadas al control de *Chusquea sp*. y gestionar productivamente estos sitios, con sistemas agroforestales, que ofrecen ventajas sociales y ecológicas adicionales para la agricultura en laderas, sirviendo además de ecotonos.

BIBLIOGRAFÍA

Brody, J. R. & Kern, S. E. (2004). Sodium boric acid: A Tris-free, cooler conductive medium for DNA electrophoresis. *BioTechniques,* 36(2), 214-216. https://doi.org/10.2144/04362BM02.

Chaplin-Kramer, R., Neugarten, R. A., Sharp, R. P., Collins, P. M., Polasky, S., Hole, D., Schuster, R., Strimas-Mackey, M., Mulligan, M., Brandon, C., Diaz, S., Fluet-Chouinard, E., Gorenflo, L. J., Johnson, J. A., Kennedy, C. M., Keys, P. W., Longley-Wood, K., McIntyre, P. B., Noon, M., … Watson, R. A. (2022). Mapping the planet's critical natural assets. *Nature Ecology & Evolution,* 7(1), 51-61. https://doi.org/10.1038/s41559-022-01934-5.

Don, A., Seidel, F., Leifeld, J., Kätterer, T., Martin, M., Pellerin, S., Emde, D., Seitz, D., & Chenu, C. (2024). Carbon sequestration in soils and climate change mitigation—Definitions and pitfalls. *Global Change Biology,* 30(1), e16983. https://doi.org/10.1111/gcb.16983.

Donoso, P. J., Promis, A., Loguercio, G. A., Attis Beltrán, H., Casseli, M., Chauchard, L. M., Cruz, G., González Peñalba, M., Martínez Pastur, G., Navarro, C., Núñez, P., Salas-Eljatib, C., Soto, D. P., & Vásquez-Grandón, A. (2022). Silviculture of South American temperate native forests. *New Zealand Journal of Forestry Science,* 52. https://doi.org/10.33494/nzjfs522022x173x.

Kemper, W.D., Rosenau, R.C. 2018.Aggregate Stability and Size Distribution; Klute, A., SSSA Book Series; Soil Science Society of America, American Society of Agronomy: Madison, WI, USA; pp. 425–442.

Miranda, A., Altamirano, A., Cayuela, L., Lara, A., & González, M. (2017). Native forest loss in the Chilean biodiversity hotspot: Revealing the evidence. *Regional Environmental Change,* 17(1), 285-297. https://doi.org/10.1007/s10113-016-1010-7.

Nanzyo, M. 2002. Unique properties of ash volcanic soils. Glob. Environ. Res. 6, 112.

Navarrete, A. A., Aburto, F., González-Rocha, G., Guzmán, C. M., Schmidt, R., & Scow, K. (2023). Anthropogenic degradation alter surface soil biogeochemical pools and microbial communities in an Andean temperate forest. *Science of The Total Environment,* 854, 158508. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158508.

Sadzawka, A.; Carrasco, M.A., Grez, R., Mora, M.L., Flores, H., Neaman, A. 2006. Métodos de Análisis Recomendados para los Suelos Chilenos; Comisión de Normalización y Acreditación, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo: Santiago, Chile, p. 113.

Wright, A.F.; Bailey, J.S. Organic carbon, total carbon, and total nitrogen determinations in soils of variable calcium carbonate contents using a Leco CN-2000 dry combustion analyzer. Commun. *Soil Sci. Plant Anal*. 2001, 32, 3243–3258.

Zagal, E., Longeri, L., Vidal, I., Hoffman, G., & González, R. (2003). Influencia de la adición de nitrógeno y fósforo sobre la descomposición de paja de trigo en un suelo derivado de cenizas volcánicas. *Agricultura Técnica,* 63(4). https://doi.org/10.4067/S0365-28072003000400009.

Zhang, R. (1997). Determination of Soil Sorptivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal,* 61(4), 1024-1030. https://doi.org/10.2136/sssaj1997.03615995006100040005x.

BIOINSUMOS Y *Canavalia ensiformis* (L.) PARA LA NUTRICIÓN INTEGRAL DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR EN HUIXTLA, CHIAPAS

Robertony Camas Gómez[1]; Altagracia Reyes Castillo[2]; Juan Patishtan Pérez[3]; Rausel Camas Pereyra[1]

[1] Campo Experimental Centro de Chiapas (INIFAP). Carretera internacional Ocozocoautla-Cintalapa km 1.5, Ocozocoautla, Chiapas, México.

[2] Campo Experimental Tecomán (INIFAP). Carretera Colima-Manzanillo km 35, Tecomán, Colima, México.

[3] Campo Experimental Las Huastecas. Carretera Tampico-Mante km 55, Villa Cuauhtémoc, Altamira, Tamaulipas, México.

Correo del autor de correspondencia: camasgomez2019@gmail.com

RESUMEN

En Huixtla, Chiapas, el 80% de las 36,000 ha cultivadas con caña de azúcar presentan suelos de baja fertilidad con valores limitantes de materia orgánica (MO), nitrógeno (N), potasio (K), boro (B), zinc (Zn) y alta salinidad, con una producción promedio de 80 t ha^{-1}. Para contribuir a la solución de este problema, se estableció un estudio con el objetivo de evaluar el efecto de bioinsumos, y abono verde de Canavalia en la calidad y rendimiento de caña de azúcar. El diseño experimental fue de bloques al azar con tres repeticiones. Los tratamientos evaluados fueron: 1) 100% Fertilización química (FQ), 2) 100 FQ+Canavalia abono verde, (C)+Bioinsumos (B), 3) 70% FQ+C, 4) 70% FQ+C+B y 5) Testigo (recomendación de organización cañera 500 kg ha^{-1} de la mezcla física 21-06-26). El bioinsumo está constituido por 3 aplicaciones de lixiviados de vermicomposta y cuatro microorganismos específicos, fijadores de nitrógeno y solubilizadores de fósforo y potasio. El 100% de FQ (423 N - 60 P_2O_5 - 383 K_2O - 18 S) y 70% de FQ (296 N - 42 P_2O_5 - 268 K_2O - 13 S) más C y B no presentaron diferencia estadística en el rendimiento, siendo en promedio de 143 t ha^{-1}. Así también el 100% de FQ más C y B tuvo un rendimiento mayor al de 100% FQ (187 kg ha^{-1}). La calidad de la caña determinada por grados Brix y Sacarosa fue mayor en los tratamientos con C y B. Estos resultados indican que la aplicación de Canavalia como abono verde, lixiviado de vermicomposta y microorganismos incrementa la calidad y rendimiento de la caña de azúcar.

PALABRAS CLAVE: Abono verde, microorganismos, sustentabilidad

INTRODUCCIÓN

En el estado de Chiapas, la mayor parte de los suelos cañeros que abastecen al Ingenio Huixtla, son de baja fertilidad con valores limitantes de materia orgánica (MO) nitrógeno (N), potasio (K), boro (B) y zinc (Zn), además presentan compactación (Toledo, 2000). Esto se debe al monocultivo y a la práctica de la quema para la realización de la zafra. Estas condiciones de baja fertilidad ocasionan que el rendimiento promedio sea de 80 t ha^{-1} considerado de bajo a medio, existiendo un potencial de rendimiento de 130 t ha^{-1}

(Sandoval, 2017). Ante la situación antes expuesta, surge la necesidad de generar un manejo de suelos en descanso que procure el mejoramiento de su fertilidad, y la nutrición integral, rentable y sostenible del cultivo.
El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de bioinsumos, y abono verde de Canavalia en la calidad y rendimiento de caña de azúcar.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el predio Rancho Nuevo, municipio de Huixtla, Chiapas, en un terreno que por presentar en el ciclo anterior un rendimiento menor de 70 t ha^{-1}, se le realizó volteo de cepas y se dejó en descanso por 10 meses.
Para realizar una caracterización física y química del suelo del área experimental se realizó un muestreo de suelos a 0-30 cm de profundidad. La muestra estuvo compuesta de 50 sub muestreos, usando un muestreador de acero inoxidable de 2 cm. Se realizaron las siguientes determinaciones; densidad aparente, textura por Bouyoucos, MO por Walkley y Black, pH $CaCl_2$, P Bray Kurtz, Ca, Mg, K y Na intercambiables extraídos con acetato de amonio 1N pH7, y aluminio intercambiable extraído con KCl 1 M., Zn extraído con DTPA y B con azometina-H en agua caliente.

La interpretación de las propiedades de los suelos se realizó de acuerdo a lo señalado a la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002).
El pH 8.2 considerado como alcalino, MO moderadamente bajo (1.6%), Mg moderadamente alto (438 mg/kg), P (26.7 $mg \cdot kg^{-1}$) y Ca (1,736 $mg \cdot kg^{-1}$) mediano, K (61.2 $mg \cdot kg^{-1}$) y B (0.19 $mg \cdot kg^{-1}$) muy bajo, Zn (0.62 $mg \cdot kg^{-1}$) y S (7.9 $mg \cdot kg^{-1}$) moderadamente bajo, nitrato bajo (4.6 $mg \cdot kg^{-1}$). El sodio alto (424 mg/kg), siendo necesario aplicar 2.5 t ha^{-1} de yeso agrícola a todos los tratamientos.

El diseño experimental utilizado fue de bloques al azar con tres repeticiones. Los tratamientos evaluados fueron: 1) 100% Fertilización química (FQ), 2) 100 FQ+Canavalia, (C)+Bioinsumos (B), 3) 70% FQ+C, 4) 70% FQ+C+B y 5) Testigo (recomendación de organización cañera 500 kg ha^{-1} de la mezcla física 21-06-26).

Mediante el método de balance nutrimental (Volke *et al.*, 1998) se determinó la FQ al 100% (423-60-383-18), para N, P_2O_5, K_2O y S, respectivamente, para una meta de rendimiento de 150 t ha^{-1}, además 8 kg de zinc y 1 de boro para suplir las deficiencias.

El tratamiento de bioinsumos consistió en un Consorcio de Microorganismos Especializados (CME) de *Azospirillum brasilense* (3.2x108 UFC/mL), *Bacillus subtilis* ($4x10^8$ UFC/mL), *Glomus intraradices* (8 esporas y propagulos/mL) y *Azotobacter* sp. ($3x10^8$ UFC/mL), así como lixiviados de vermicomposta enriquecidos con minerales. En el mes de agosto se sembró Canavalia a una densidad de 200,000 plantas por hectárea y en el mes de noviembre se incorporó en verde a razón de 15 t ha^{-1} de materia seca. Después de seis meses de haberse incorporado la Canavalia, se realizaron las determinaciones químicas nuevamente por medio de los métodos antes mencionados.

La fertilización química se realizó en tres aplicaciones. La primera, a la siembra, con 15% de N, 100% de fósforo (P_2O_5) y 50% de K_2O. La segunda a los 120 días, con 42.5% de N y 50% de K_2O, y la tercera a los 180 días con el 42.5% de N restante. Los tratamientos con bioinsumos incluyeron tres aplicaciones de microorganismos y lixiviado. En cada

aplicación se mezclaron 3 litros de cada microorganismo y 300 litros de lixiviado. Las aplicaciones se realizaron a drench, después de cada una de las tres fertilizaciones químicas, dirigiendo la aspersión a la zona donde se depositó el fertilizante.

El tamaño de las parcelas experimentales fue de seis surcos de 1.5 m de ancho y 50 m de largo. La parcela útil para evaluación de rendimiento de grano fue de dos surcos centrales de 10 m de largo. Se evaluó altura de planta, grosor de tallo, número de tallos por metro, rendimiento de campo y de azúcar. Se tomaron muestras compuestas de las repeticiones para determinar grados Brix, sacarosa y fibra. Se realizó un análisis estadístico para un diseño de bloques completos al azar, con el software INFOSTAT V.2018. Cuando el ANOVA detectó diferencia estadística significativa, se realizó comparación de medias con la prueba de Tukey (a=0.05).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza presentó diferencia altamente significativa ($p<0.01$) entre tratamientos, para todas las variables, siendo el tratamiento testigo el que presentó los menores valores (Cuadro 1). El tratamiento de 100% FQ y 70% FQ+C+B presentaron altura, grosor de tallo y rendimiento estadísticamente iguales. Lo cual supone que el 30% de la FQ (127-18-115-5) es suplida por el aporte nutricional de los bioinsumos y Canavalia. Resultados similares se han obtenido en Brasil donde el solo uso de microorganismos diazotróficos fijadores de nitrógeno, podría suplir entre el 30% y 70% de las necesidades de nitrógeno en caña de azúcar (Montenegro *et al*, 2022). Lo anterior se atribuye a que para bacterias promotoras del crecimiento vegetal como *Azotobacter* y *Azospirillum*, además de la fijación biológica de nitrógeno, aportan fitohormonas (Velasco, 2014). Este efecto positivo ha sido reportado en más de 76% de las experiencias evaluadas en campo, mostrando respuesta positiva e incrementos del rendimiento de entre 25% y 35% (Torriente, 2010), reportando ganancias económicas por sustitución de los fertilizantes químicos en rangos de 25 a 32% (Ortega *et al*., 2009).

El tratamiento de 70% FQ+C indica que, mediante la incorporación de Canavalia, puede disminuirse el 30% de FQ y a la vez incrementarse el rendimiento en 26 t ha^{-1} con respecto al testigo. Esto se debe al efecto de la incorporación de 15 t ha^{-1} de materia seca con 2.1 % N total incorporado en verde, que representa un aporte de N de 315 kg ha^{-1}. Un aporte proporcional de N (155 kg ha^{-1}) fue obtenido por Cordova *et al*. (2016), para un rendimiento de materia seca de 7.2 t ha^{-1} en condiciones ambientales similares en Tabasco. Al adicionar la componente de bioinsumos (70% FQ+C+B) la diferencia en rendimiento con el testigo se incrementa aún más siendo del orden de 38 t ha^{-1}.

El tratamiento que presentó mayor rendimiento fue el de 100% FQ+C+B, lo cual nuevamente indica que si a una recomendación de FQ balanceada, basada en la oferta nutricional del suelo y demanda del cultivo, se le adicionan los componentes de C y B, se puede favorecer la disponibilidad y eficiencia de los fertilizantes químicos influyendo en una mayor producción de caña de azúcar. Esto fue evidente en los valores de algunas propiedades químicas después de seis meses de haberse incorporado la Canavalia, en donde se tuvieron los siguientes incrementos con respecto al testigo: MO 0.8%, $N\text{-}NO_3$

67.4, P_2O_5 32, K_2O 123 y SO_4 14.5 mg kg^{-1}, lo cual explica el efecto de este manejo en la sustitución de los fertilizantes químicos.

Cuadro 1. Efecto de la fertilización química, Canavalia y bioinsumos en la altura, grosor, número de tallos y rendimiento de caña de azúcar en el primer ciclo de producción. Localidad Rancho Nuevo. PV 2024.

Tratamiento	Altura de planta (m)	Grosor (cm)	No. tallos/m	Rendimiento de campo t ha^{-1}
100% FQ+C+B	3.90 a†	3.5 a	28 a	187 a
70% FQ+C+B	3.80 a b	3.3 a b	26 a b	145 b
100% FQ	3.43 b c	2.9 b c	23 b	142 b
70% FQ+C	3.40 c	3.0 a b	25 a b	133 c
Testigo (Organización)	2.90 d	2.4 c	24 a b	107 d
CV (%)	3.9	7	5.7	5
DMS (0.05%)	0.24	0.38	4	4.2

FQ=fertilización química; C=leguminosa; B=bioinsumos

† Valores seguidos por la misma letra dentro de cada columna no difieren con significancia estadística entre sí (Tukey, $P \leq 0.05$).

Para la calidad de la caña de azúcar, se observó un comportamiento similar al presentado para rendimiento, determinando que los tratamientos que incluyeron el componente de Canavalia y bioinsumos tuvieron los mayores valores de grados Brix y sacarosa y menores de fibra (Cuadro 2). Lo cual indica que el uso de estos componentes nutricionales favorece la disponibilidad y eficiencia de los nutrientes mejorando la calidad del producto.

Cuadro 2. Efecto de la fertilización química, Canavalia y bioinsumos, en indicadores de calidad de caña de azúcar en su primer ciclo de producción. Localidad Rancho Nuevo 2. PV 2024.

Tratamiento	Grados Brix	Sacarosa jugo %	Fibra	Rendimiento de campo t ha^{-1}	Rendimiento de azúcar
Testigo (Organización)	18.4	16.4	15.0	107	17.5
100% FQ	18.9	17.4	14.4	142	24.7
70% FQ+C	19.5	17.4	14.2	133	23.1
100% FQ+C+B	20.2	18.8	13.8	187	35.2
70% FQ+C+B	19.7	17.9	14.8	145	26.0

Análisis realizados en el laboratorio del Ingenio Huixtla, Chiapas.Muestras compuestas sin repeticiones. FQ=fertilización química; C=leguminosa; B=bioinsumos. No se presenta significancia entre tratamientos debido a que fue un análisis de una muestra compuesta de tres repeticiones.

CONCLUSIONES

La aplicación conjunta de bioinsumos y *Canavalia ensiformis* incorporada como abono verde, combinada con la fertilización química restringida al 70%, permitió obtener un rendimiento de caña de azúcar similar al 100% de fertilización química y mejora la calidad del producto expresado en mayores valores de grados Brix y contenido de sacarosa y menor valor de fibra.

BIBLIOGRAFÍA

Córdova, G.G., Salgado G.S., Castelán E.M., Palma L.D.J., García M.E., Lagunes E.L.D.C., & Córdova, S.S. (2016). Opciones de fertilización para el cultivo de caña de azúcar (Saccharum sp.) en Tabasco, México. *Agro Productividad*, 9 (3), 27-34.

Montenegro, S. P.; Pulido, S. y Mina, J. 2022. Fijación biológica de nitrógeno en caña de azúcar: una alternativa a gases nitrogenados efecto invernadero. *Agricolae & Habitat,* 5 (1), 40-57.

Ortega, E., Fernández, L., Ortega, R. P. & Rodés, R. 2009 La fijación biológica del nitrógeno en la caña de azúcar. [En línea] La Habana: Laboratorio de Fisiología Vegetal, Facultad de Biología, Universidad de la Habana.

Torriente, D. (2010). Aplicación de bacterias promotoras del crecimiento vegetal en el cultivo de la caña de azúcar. Perspectivas de su uso en Cuba.

Velasco, V. 2014. Los biofertilizantes y la producción de caña de azúcar (*Saccharum* spp.). *Agro Productividad,* 7(2).

Sandoval, G.B. 2017. Trabajo seguro para mejorar la productividad en la producción y cosecha de caña en Huixtla. Una alternativa para el fortalecimiento de la industria azucarera en México a través de las redes de acción global para la sostenibilidad de la caña. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de México. Facultad de ciencias políticas y sociales. Cd. de México, México. 144 p.

Toledo, T. E. (2000). Alternativas sostenibles para el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en el Soconusco, Chiapas.

Tesis de Maestría, UNACH, Campus IV. Huehuetán, Chiapas, México. 86 p.

DOF. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. http://dof.gob.mx/nota detalle.php?codigo=717582&.

Volke, H.V., Etchevers, B.J.D., Sanjuan, R.A. & Silva, P.T. (1998). Modelo de balance nutrimental para la generación de recomendaciones de fertilización para cultivos. *Terra Latinoamericana,* 16 (1), 79-91.

MACRO Y MESOFAUNA EDÁFICA BAJO DIFERENTES PRÁCTICAS DE MANEJO DEL SUELO EN SAN JOSÉ LAS FLORES, HUIXTÁN, CHIAPAS

Víctor Manuel Martínez Vázquez[1]

[1] Universidad Autónoma de Chapingo, Departamento de Suelos, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

Correo del autor de correspondencia: al22101062@chapingo.mx

RESUMEN

El estudio evaluó la macro y mesofauna edáfica en dos sistemas de manejo del suelo: una huerta de durazno (*Prunus persica*) y una parcela de maíz (*Zea mays L.*) de temporal en San José las Flores, Huixtán, Chiapas, mediante muestreos de suelo, extracción de organismos y análisis de parámetros químicos. Los resultados mostraron diferencias significativas en la composición y diversidad de las comunidades: la huerta presentó mayor abundancia de lombrices, consideradas bioindicadores de calidad del suelo, mientras que el maíz registró mayor diversidad general, influida por la presencia de *Staphylinidae* y larvas. Los índices de diversidad (Shannon y Simpson) fueron más altos en el maíz, aunque con distribución desigual de especies. Las variaciones en la fauna se asociaron parcialmente con el contenido de nitrógeno y potasio, pero no con el pH ni la conductividad eléctrica. Se concluye que las prácticas de manejo influyen fuertemente en la estructura faunística del suelo y se recomienda ampliar los muestreos para comprender mejor la dinámica de estas comunidades y su papel en la fertilidad del suelo.

PALABRAS CLAVE: *Diversidad biológica; fertilidad del suelo; manejo agrícola.*

INTRODUCCIÓN

La fauna edáfica, ayuda al suelo a ser fértil, saludable y duradero. Organismos que son más grandes que 2 mm, como lombrices, hormigas y termitas caben en el grupo de la macrofauna, y más pequeños que 2 mm, como los ácaros y los colémbolos en la mesofauna, ambos grupos, juegan un papel en la descomposición de plantas y animales muertos, creando grupos de partículas, moviendo nutrientes, controlando poblaciones microbianas y plagas, además de, mejorar el suelo para otros seres vivos (Sanjuan *et al.*, 2022; Gholami *et al.*, 2016). Por estas funciones se les denomina "ingenieros del ecosistema" debido a su capacidad de modificar el hábitat y facilitar la disponibilidad de recursos para otros organismos (Sanjuan *et al.*, 2022). Si se laborea de manera intensiva, se hace uso de productos químicos, compactamos el suelo o perdemos la cobertura, reducimos la riqueza y la cantidad de formas de vida. Pero si utilizamos métodos conservacionistas como la agroforestería, la rotación de cultivos, el plantío directo y la adición de materia orgánica, podemos proteger y aumentar la diversidad y el número de formas de vida.

Cuando los bosques se convierten en parcelas agrícolas, las comunidades que viven allí enfrentan muchos desafíos. El nuevo entorno afecta el clima, los animales y las plantas, y las fuentes de alimentos, que alteran el funcionamiento típico del ecosistema (Nielsen *et al.,* 2015). En algunos lugares como San José Las Flores, Huixtán, Chiapas, no se sabe mucho sobre cómo el manejo agrícola afecta a los seres vivos en el suelo. En este contexto, el presente estudio tiene como propósito ver cómo la forma en que se maneja la tierra afecta a los diferentes tipos de seres vivos en el suelo y cómo el suelo y el medio ambiente afectan esta relación, así como, generar información útil para ayudar a proteger y conservar el suelo en un área marginada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del sitio. El estudio se realizó en San José las Flores, Huixtán, Chiapas, una localidad situada en la provincia fisiográfica de las Sierras de Chiapas y Guatemala. La zona se caracteriza por un clima templado húmedo con abundantes lluvias en verano, una temperatura promedio de 14-22 °C y una precipitación anual de 1,200-2,000 mm. Los suelos predominantes son los Alisols y la actividad económica principal es la agricultura, con cultivos de maíz y frijol (INEGI, 2010). El muestreo se llevó a cabo en dos sitios, uno se realizó en una parcela de maíz de temporal y otro en una huerta frutal de durazno.

Muestreo de la macrofauna edáfica. Para evaluar la diversidad de la macrofauna del suelo, se recolectaron tres monolitos de suelo (de 25 x 25 x 30 cm) por cada tipo de manejo (maíz de temporal y huerta de durazno). La recolección se realizó en diciembre y se utilizó la metodología estandarizada para la clasificación de macroinvertebrados con un tamaño corporal mayor a 2 mm.

Extracción de la mesofauna edáfica. La extracción de la mesofauna se realizó por el método del Embudo de Berlese-Tullgren (Palacios-Vargas *et al.,* 2014)

Determinación de parámetros químicos del suelo. Para la determinación de pH y conductividad eléctrica (CE) se siguió la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), mientras que para la medición cualitativa de N y K se llevó a cabo el método de Hanna (Test kit de suelo H 13896).

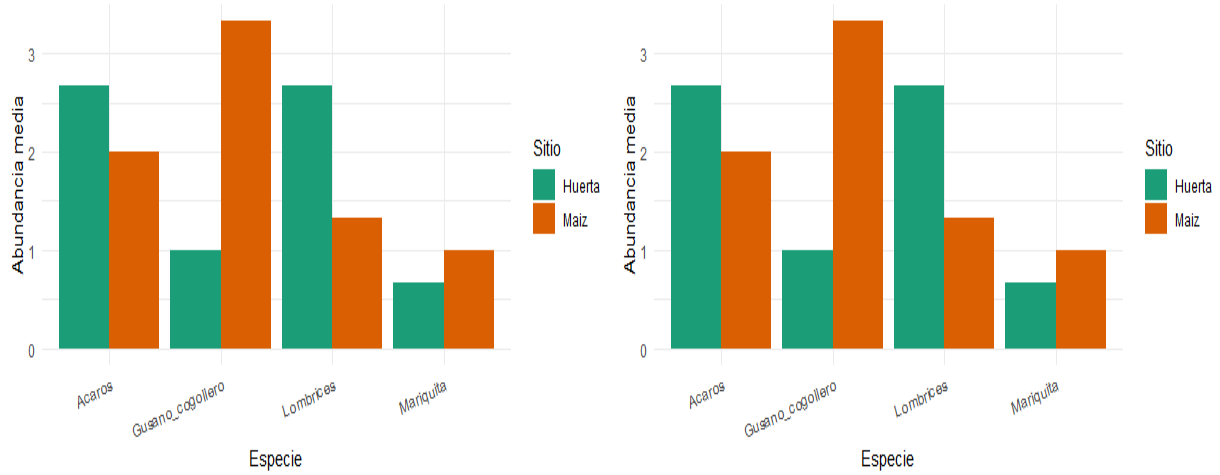
Análisis estadístico. Se realizó un análisis estadístico integral utilizando el programa R (versión 4.4.2). Los datos originales consistieron en conteos de abundancia por especie, organizados por sitio (huerta/maíz) y réplica (tres repeticiones por sitio). Se evaluó la relación entre los parámetros químicos y la abundancia de las especies a partir de la correlación y la covarianza. Además, se calcularon índices ecológicos clave para cada réplica: Riqueza de especies, Índice de Shannon-Wiener (H') y Índice de Simpson (1-D).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos revelaron diferencias notables en la composición y estructura de las comunidades edáficas entre los sistemas de huerta y maíz (Figura 1), lo cual concuerda con lo señalado por Castro *et al.* (2015) acerca de la sensibilidad de estos organismos a las condiciones del suelo. En cuanto a la macrofauna, la huerta presentó una mayor abundancia de lombrices, aproximadamente el doble que en el maíz. Este hallazgo es relevante, ya que las lombrices son consideradas bioindicadores clave de la

calidad del suelo (Cuevas *et al.*, 2019). Sin embargo, Staphylinidae destacó al mostrar una abundancia considerable en el maíz, lo que podría relacionarse con diferencias en la estructura vegetal y la disponibilidad de recursos entre ambos sistemas (Pessotto *et al.*, 2020). En la mesofauna también se observaron contrastes. Las larvas fueron más abundantes en el maíz que en la huerta, donde no se registraron. Los ácaros se encontraron en mayor número en la huerta frente al maíz, mientras que los colémbolos estuvieron presentes solo en el maíz. Este patrón, como señalan Pessotto *et al.* (2020), refleja la influencia de la intensidad y el tipo de manejo en la composición de las comunidades edáficas.

Figura 1. Abundancia de especies por sitio.



Los índices de diversidad (Cuadro 1) confirmaron estas diferencias: el maíz presentó valores más altos tanto en Simpson (0.912) como en Shannon (2.223), en comparación con la huerta (0.817 y 1.554, respectivamente). No obstante, esta mayor diversidad en el maíz estuvo influenciada por la fuerte presencia de *Staphylinidae* y larvas, lo que indica una distribución desigual entre especies. Tal como explican Cuevas *et al.* (2019), un sistema puede mostrar un mayor número de especies, pero si estas no se distribuyen de forma equitativa, la funcionalidad de la comunidad se ve comprometida.

Cuadro 1. Índices de diversidad y parámetros químicos del suelo

Manejo	**Índice de diversidad**		**pH**	**CE (dS m^{-1})**	**N**	**K**
	Simpson (1-D)	Shannon				
Huerta	0.817	1.554	4.59	0.19	medio	bajo
Maíz	0.912	2.223	5.00	0.26	alto	muy bajo

Al relacionar estos resultados con los parámetros químicos del suelo, se observa que ambos sistemas presentan condiciones ácidas y conductividad eléctrica bajas. A partir del análisis de correlación, se observó que las lombrices, los sínfilos y los ácaros presentaron correlación positiva respecto al pH y la CE, mientras que, los otros organismos mostraron

una relación negativa, pero la covarianza no reflejó asociaciones fuertes respecto a estos parámetros. El maíz presentó más nitrógeno, y de acuerdo con Castro *et al.,* 2015 esto podría explicar la mayor presencia de las larvas en este sitio. El potasio se encontró en bajas concentraciones en ambos sitios, lo que, de acuerdo con Castro *et al.,* 2015 podría limitar el desarrollo equilibrado de algunas especies y contribuir a la dominancia de pocos grupos.

Las especies que no se encontraron presentes en ambos sitios no pudieron ser comparadas de manera adecuada, lo que hizo que el análisis estadístico fuera menos útil.

CONCLUSIÓN

La fauna edáfica difirió entre ambos sitios, reflejando la influencia del manejo agrícola. La huerta presentó una abundancia de lombrices, indicador de fertilidad, mientras que en el maíz hubo mayor diversidad, pero dominada por pocos grupos. Las diferencias se relacionaron principalmente con el nitrógeno y el potasio, y no con el pH ni la conductividad eléctrica. Aún se requieren más estudios para comprender mejor la dinámica edáfica con la fertilidad del suelo y orientar un manejo más equilibrado del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

Castro, J., Lago, M., Briones, M., Gallego, P. & Barreal, M. (2015). EFFECTS OF AGRICULTURAL PRACTICES ON SOIL FAUNA COMMUNITIES IN KIWIFRUIT PLANTATIONS. *Acta Horticulturae*, 1096, 267-273.

Cuevas, F. D. M., García, J. A., Mireles, H. C. & Viveros, J. A. F. (2019). Fauna y microflora edáfica asociada a diferentes usos de suelo. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *6*(16), 23-33. https://doi.org/10.19136/era.a6n16.1792

Gholami, S., Sayad, E., Gebbers, R., Schirrmann, M., Joschko, M., & Timmer, J. (2016). Spatial analysis of riparian forest soil macrofauna and its relation to abiotic soil properties. *Pedobiologia, 59*(1-2), 27-36.

INEGI. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010. Huixtán, Chiapas.

Nielsen, U. N., Wall, D. H. & Six, J. (2015). Soil Biodiversity and the Environment. *Annual Review Of Environment And Resources, 40*(1), 63-90. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021257

Palacios-Vargas, J. G., Mejía-Recamier, B. E. & De Oyarzabal, A. (2014). Guía ilustrada para los artrópodos edáficos. México: UNAM, Facultad de Ciencias.

Pessotto, M. D. F., Santana, N. A., Jacques, R. J. S., Freiberg, J. A., Machado, D. D. N., Piazza, E. M., Neto, L. R. & Antoniolli, Z. I. (2020). RELAÇÃO DO USO DO SOLO COM a DIVERSIDADE e a ATIVIDADE DA FAUNA EDÁFICA. *Nativa*, *8*(3), 397-402. https://doi.org/10.31413/nativa.v8i3.9769

Sanjuan, A. B., González, L. C. & De Mello Prado, R. (2022). Mesofauna edáfica, algunos estudios realizados: Revisión. Inge CUC, 18(2), 197-208. https://doi.org/10.17981/ingecuc.18.2.2022.16

SEMARNAT. (2002, 31 de diciembre). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000: Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, Segunda Sección. https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal.

COMPARACIÓN DEL MANEJO REGENERATIVO Y CONVENCIONAL EN PROPIEDADES DEL SUELO Y CRECIMIENTO ESTRUCTURAL DE MANZANO

Juan Luis Jacobo Cuéllar[1,2]; Luis Ernesto Mancera Juárez[2]; David I. Berlanga Reyes[2,3]; Claudio Ríos Velasco[3]; Dámaris L. Ojeda Barrios[1]; Oscar Cruz Álvarez[1].

[1] Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Presa de La Amistad 2015, La Presa, 31510, Cuauhtémoc, Chih.

[2] Colegio de Ingenieros Fruticultores del Noroeste del estado de Chihuahua, Calle Mirador 1845, 31543, Cuauhtémoc, Chih.

[3] Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, Av. Río Conchos S/N, Parque Industrial, 31570, Cuauhtémoc, Chih.

Correo del autor de correspondencia: ocruz@uach.mx

RESUMEN

La agricultura regenerativa se plantea como una alternativa viable frente al manejo convencional, al favorecer la estructura y funcionalidad de los suelos. El presente estudio tuvo como propósito comparar el manejo regenerativo y convencional en propiedades del suelo y en variables de crecimiento de manzano (*Malus domestica* Borkh.), bajo condiciones edafoclimáticas similares en Namiquipa, Chihuahua (México). Durante 2024 se evaluaron dos huertos 'Golden Delicious' de 25 años de edad. Se tomaron muestras de suelo a 0–30 cm para análisis fisicoquímico y en los árboles, perímetro de tronco, crecimiento vegetativo, número de hojas, área foliar y densidad estomática. Los datos fueron analizados con estadística descriptiva y prueba "t" de Student ($p < 0.05$). El manejo regenerativo mostró menor compactación (profundidad de penetración a 250 psi: 20.4±6.7 vs 15.1±6.7 cm; $p < 0.01$), mayor conductividad hidráulica (3.8±0.2 vs 3.3±0.2 cm h^{-1}; $p < 0.01$), con materia orgánica similar (1.9±0.3 vs 2.2±0.3%, $p > 0.05$). Químicamente presentó menores contenidos de P, Ca, Mg, Fe y Cu ($p \leq 0.04$) y mayor Mn (7±0.9 vs 4±0.6 mg kg^{-1}; $p < 0.01$); el pH ligeramente más alto (8.7±0.2 vs 8.3±0.3; $p = 0.05$). En planta, incrementó el área foliar (50.3±12.7 vs 37.9±8.8 cm^2; $p < 0.01$) y la densidad estomática (354±83 vs 314±93 estomas mm^{-2}; $p < 0.01$). Se concluye que el manejo regenerativo contribuye a mejorar la estructura física del suelo y potencia rasgos foliares asociados a la fotosíntesis, lo cual lo convierte en una alternativa sostenible frente al manejo convencional.

PALABRAS CLAVE: *Área foliar; conductividad hidráulica; densidad estomática; Malus domestica; porosidad funcional.*

INTRODUCCIÓN

El sistema de manejo convencional de agroecosistemas, caracterizado por el uso intensivo de insumos químicos y labores mecánicas, ha contribuido a incrementar los rendimientos a corto plazo; sin embargo, se asocia a efectos negativos como la

degradación de la estructura edáfica, la disminución de la biodiversidad microbiana y la pérdida de resiliencia del sistema productivo (Lal, 2020; Bünemann *et al.,* 2018). Estos procesos limitan la capacidad del suelo para sostener la productividad a largo plazo y ponen en riesgo la estabilidad de los sistemas frutícolas. En contraste, la agricultura regenerativa se plantea como una alternativa integral para restaurar y mantener la salud del suelo mediante prácticas como la cobertura vegetal permanente, la incorporación de materia orgánica, la diversificación de especies y la reducción del laboreo. Estas acciones promueven la agregación del suelo, incrementan la captura de carbono y optimizan el reciclaje de nutrientes, lo que favorece procesos biogeoquímicos fundamentales y la sostenibilidad de los cultivos (Rhodes, 2017; Gattinger *et al.,* 2012). A pesar de la evidencia creciente de sus beneficios en cultivos anuales, los estudios en frutales perennes son aún limitados, lo que representa un vacío de conocimiento relevante (Montanaro *et al.,* 2017; Atucha *et al.,* 2011).

En el caso del manzano (*Malus domestica*), la fisiología foliar incluyendo el área foliar y la densidad estomática constituye un indicador sensible del estado del suelo y de la eficiencia fotosintética de la planta (Roussos y Gasparatos, 2009; Laužikė *et al.,* 2020; Kviklys *et al.,* 2022). Comprender cómo el manejo regenerativo incide en estas variables es fundamental para valorar su viabilidad como estrategia agronómica en huertos establecidos. El objetivo de esta investigación fue comparar los sistemas regenerativo y convencional en sus efectos sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, así como en variables estructurales de crecimiento y fisiología foliar en manzano. Se planteó la hipótesis de que el manejo regenerativo mejora la condición edáfica y favorece el desarrollo fisiológico del cultivo, constituyendo una alternativa sostenible frente al manejo convencional.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en 2024 en dos huertos comerciales de manzano (*Malus domestica* cv *Golden Delicious*) plantados en el año 2000, ubicados en Colonia Oscar Soto Máynez, Namiquipa, Chihuahua, México. Ambos huertos presentaron condiciones edafoclimáticas similares; uno (29°00’33’’ N y 107°29’43’’ W) se maneja bajo prácticas regenerativas y otro (29°01’28’’ N y 107°30’28’’ W) bajo sistema convencional. En cada huerto se seleccionaron al azar cuatro sitios de muestreo en suelo y planta. Las muestras de suelo se colectaron a una profundidad de 0–30 cm y se procesaron en laboratorio certificado, siguiendo protocolos estandarizados. Se determinaron: textura (Método de Bouyoucos), conductividad hidráulica (cilindros infiltrómetros), materia orgánica (Walkley-Black), capacidad de campo y punto de marchitez permanente (método gravimétrico), pH y conductividad eléctrica (potenciómetro y conductímetro HANNA instruments), carbonatos totales (calcímetro de Bernard) fósforo disponible (Olsen), cationes intercambiables Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+} (acetato de amonio pH 7, analizados por espectometría de absorción atómica Perkin-Elmer), micronutrientes Fe, Zn, Cu, Mn (DTPA espectrofotometría de absorción atómica), y capacidad de intercambio catiónico. En la planta se evaluaron variables estructurales y fisiológicas: perímetro de tronco (medido con cinta diamétrica a 30 cm sobre el nivel del suelo), crecimiento vegetativo

(longitud de brotes por ciclo), número de hojas por brote, área foliar (determinada con integrador portátil LI-COR 3100C, LI-COR Biosciences) y densidad estomática (estomas mm^{-2}, obtenida mediante impresión foliar con barniz transparente y observación al microscopio óptico Olympus BX51). El análisis estadístico se realizó en R (versión 4.4.2, R Core Team, 2024). Se aplicó estadística descriptiva y la prueba t de Student para comparación de medias entre sistemas de manejo, con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas del suelo. Ambos sistemas presentaron textura franca. El manejo regenerativo mostró menor compactación, evidenciada por una mayor profundidad de penetración de raíces (20.4±6.7 cm) respecto al convencional (15.1±6.7 cm, $p < 0.04$), así como una mayor conductividad hidráulica (3.8±0.2 vs. 3.3±0.2 cm h^{-1}; p=0.008) (Cuadro 1). El punto de saturación y capacidad de campo fueron significativamente menores en el sistema regenerativo ($p < 0.001$), lo que sugiere una menor retención, pero con mayor disponibilidad de agua útil debido a una mejor porosidad funcional. La materia orgánica no mostró diferencias significativas (1.9±0.3 vs. 2.2±0.3%) (Cuadro 1). Estos resultados coinciden con Blanco-Canqui y Rius (2020), Atucha *et al*. (2011) y Montanaro *et al*. (2017), quienes señalan que prácticas de reducción del laboreo y cobertura vegetal promueven una estructura más porosa y eficiente para el movimiento de agua y aire en el perfil edáfico.

Propiedades químicas del suelo. El manejo convencional presentó mayores concentraciones de P, Ca, Mg, Fe, Cu y Mn ($p < 0.04$) (Cuadro 2), mientras que el manejo regenerativo destacó por valores superiores de Mn (7 vs. 4 mg kg^{-1}; $p < 0.01$). El pH fue alcalino en ambos casos, con tendencia ligeramente mayor en el regenerativo (8.7 vs 8.3, p=0.05), lo que puede limitar la disponibilidad de micronutrientes como Fe y Zn por precipitación en formas no asimilables. La mayor presencia de Mn bajo manejo regenerativo podría relacionarse con una mayor actividad microbiana y un microambiente edáfico más dinámico, en concordancia con estudios de Carranca, (2018) y Roussous y Gasparatos (2009). Estos hallazgos evidencian que, aunque el manejo convencional aporta mayores niveles de nutrientes vía fertilización, el regenerativo puede favorecer una nutrición equilibrada mediante procesos biológicos y mayor eficiencia en el uso de nutrientes.

Variables de planta. No se observaron diferencias significativas en el vigor estructural (perímetro de tronco y longitud de brotes), lo que indica que, en el corto plazo, la sustitución de prácticas no compromete la arquitectura del árbol. Sin embargo, el sistema regenerativo presentó un aumento significativo en el área foliar (50.3 cm^2 vs. 37.9 cm^2, $p < 0.01$) y densidad estomática (354 vs. 314 estomas mm^{-2}, $p < 0.01$) (Cuadro 3). Estos indicadores reflejan un mayor potencial fotosintético y eficiencia en el intercambio gaseoso, aspectos fundamentales para la productividad en el largo plazo. De acuerdo con Kviklys *et al.* (2022), la densidad estomática se correlaciona positivamente con la capacidad de adaptación fisiológica bajo condiciones de estrés hídrico y nutricional.

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas del suelo en huertos de manzano bajo manejo convencional y regenerativo.

Parámetros	Convencional	Regenerativo	p-valor
Físicas del suelo			
Textura del suelo	Franco	Franco	
Profundidad de penetración a 250 psi (cm)	15.1±6.7 b*	20.4±6.7 a	0.04
Punto de saturación (%)	41.6±0.7 a	39.3±0.3 b	<0.001
Capacidad de campo (%)	22.1±0.4 a	20.9±0.2 b	<0.001
Punto de marchitez permanente (%)	13.2±0.2 a	12.4±0.1 b	<0.001
Materia orgánica (%)	2.2±0.3 a	1.9±0.3 a	0.172
Conductividad hidráulica (cm h^{-1})	3.3±0.2 a	3.8±0.2 b	0.008
Densidad aparente (g cm^{-3})	1.1±0.1 a	1.3±0.1 a	0.051
Químicas del suelo			
N-total (mg/kg)	18±11 a*	10±5 a	0.12
P (mg/kg)	102±41 a	48±2 b	0.04
K (mg/kg)	684±263 a	548±129 a	0.90
Ca (mg/kg)	1971±161 a	1546±104 b	<0.01
Mg (mg/kg)	415±54 a	284±22 b	<0.01
Zn (mg/kg)	5±0.9 a	4±1.6 a	0.09
Mn(mg/kg)	4±0.6 b	7±0.9 a	<0.01
Fe (mg/kg)	12±0.7 a	9±1.6 b	0.02
Na (mg/kg)	114±54 a	83±11 a	0.17
pH	8.3±0.3 b	8.7±0.2 a	0.05
Salinidad (dS/m)	0.7±0.3 a	0.4±0.1 a	0.11
CO_3 totales (%)	1.4±0.2 a	0.94±0.1 b	<0.01
Cu (mg/kg)	1.1±0.1 a	0.86±0.1 b	<001
B (mg/kg)	0.9±0.3 a	1.1±0.2 a	0.14
CIC (meq/100g)	15.5±1.8 a	11.8±0.9 b	<0.01
Planta			
Perímetro de tronco (cm)	7.5 ± 2.1 a	49.7 ± 5.0 a	0.5
Crecimiento vegetativo (cm)	24.4 ± 9.2 a	22.7 ± 4.8 a	0.3
Número de hojas por brote	14 ± 2.4 a	15 ± 1.9 a	0.1
Área foliar (cm^2)	37.9 ± 8.8 b	50.3 ± 12.7 a	<0.01
Número de estomas mm^{-2}	314 ± 93.8 b	354 ± 83.0 a	<0.01

Los datos son presentados como valores medios ± DE = desviación estándar; * Valores con la misma letra en la misma fila no difieren estadísticamente ($p \leq 0.05$) bajo la prueba t de Student.

CONCLUSIONES

El manejo regenerativo redujo la compactación del suelo y mejoró la conductividad hidráulica, generando una estructura edáfica más porosa y eficiente en la circulación y retención de agua disponible. Aunque el manejo regenerativo presentó menores niveles de P, Ca, Mg, Fe y Cu que el convencional, los valores se mantuvieron en rangos adecuados para el cultivo. El incremento de Mn y la estabilidad del N, K y Zn sugieren que este sistema promueve un balance nutricional mediado por la actividad biológica del suelo. A nivel de planta, el mayor desarrollo foliar y la mayor densidad estomática observados en el sistema regenerativo indican un potencial fotosintético superior y una

mayor eficiencia en el intercambio gaseoso, lo que representa ventajas fisiológicas con implicaciones positivas para la productividad a largo plazo.

BIBLIOGRAFÍA

Atucha, A., Merwin, I.A. & Brown, M.G. (2011). Long-term effects of four groundcover management systems in an apple orchard. *HortScience,* 46(8), 1176–1183. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.8.1176.

Blanco-Canqui, H. & Ruis, S.J. (2020). Cover crop impacts on soil physical properties: A review. Soil Science Society of America Journal, 84(5), 1527–1576. https://doi.org/10.1002/saj2.20129.

Bünemann, E.K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R.E., De Deyn, G., de Goede, R., … Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry,* 120, 105–125. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

Carranca, C. (2018). Nitrogen nutrition of fruit trees to reconcile productivity and environmental concerns. *Plants,* 7(1), 4. https://doi.org/10.3390/plants7010004.

Gattinger, A., Muller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fliessbach, A., Buchmann, N., Mäder, P., Stolze, M., Smith, P., Scialabba, N.E.H. & Niggli, U. (2012). Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 109(44), 18226–18231. https://doi.org/10.1073/pnas.1209429109.

Kviklys, D., Viškelis, J., Liaudanskas, M., Janulis, V., Laužikė, K., Samuolienė, G., Uselis, N. & Lanauskas, J. (2022). Apple fruit growth and quality depend on the position in tree canopy. *Plants,* 11(2), 196. https://doi.org/10.3390/plants11020196.

Lal, R. (2020). Regenerative agriculture for food and climate. *Journal of Soil and Water Conservation,* 75(5), 123A–124A. https://doi.org/10.2489/jswc.2020.0620A.

Laužikė, K., Uselis, N., Kviklys, D. & Samuolienė, G. (2020). Orchard planting density and tree development stage affect the physiological processes of apple (*Malus domestica* Borkh.) tree. *Agronomy,* 10(12), 1912. https://doi.org/10.3390/agronomy10121912.

Montanaro, G., Celano, G., Dichio, B. & Xiloyannis, C. (2017). Orchard management, soil organic carbon and ecosystem services in Mediterranean fruit tree crops. *Scientia Horticulturae,* 217, 92–101. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.01.012.

Rhodes, C.J. (2017). The imperative for regenerative agriculture. Science Progress, 100(1), 80–129. https://doi.org/10.3184/003685017X14876775256165.

Roussos, P.A., & Gasparatos, D. (2009). Apple tree growth and overall fruit quality under organic and conventional orchard management. *Scientia Horticulturae,* 123(2), 247–252. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.09.011.

CARACTERIZACIÓN MORFOANATÓMICA DE COMUNIDADES ECTOMICORRÍCICAS PARA LA RESTAURACIÓN DE SUELOS DEGRADADOS

Dafne Fernanda Juárez Zavala[1]; Elizabeth Hernández Acosta[1,2]; Jesús Pérez Moreno[3]; Carlos Leopoldo Cíntora González[1]; Magdalena Martínez Reyes [3]

[1] División de Ciencias Forestales, Posgrado en Ciencias Forestales y del Ambiente
[2] Departamento de Enseñanza Investigación y Servicio en Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.
[3] Programa Edafología. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Montecillos, Texcoco, Estado de México, México.

Correo del autor de correspondencia: ehernandeza@chapingo.mx

RESUMEN

La degradación del suelo en México afecta gravemente los ecosistemas forestales. Este estudio evalúa la persistencia de la inoculación con hongos ectomicorrízicos comestibles en el desarrollo de coníferas en un área rehabilitada del Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl. Se analizaron *Pinus greggii*, *P. oocarpa* y *P. maximartinezii* inoculados con *Laccaria laccata*, *Suillus kaibabensis* y *Hebeloma mesophaeum*. Tras 9 años y 6 meses de la reforestación, la caracterización morfoanatómica confirmó la presencia continua de estructuras ectomicorrízicas, evidenciando la estabilidad de la simbiosis. La inoculación con estos hongos favorece la persistencia simbiótica a largo plazo, contribuyendo a la recuperación ecológica del sitio. Se recomienda realizar análisis moleculares (ADN) para confirmar la identidad fúngica y profundizar en su funcionalidad ecológica a largo plazo.

PALABRAS CLAVE: *ectomicorrizas, morfotipos, reforestación, simbiosis.*

INTRODUCCIÓN

La degradación del suelo en México, causada principalmente por deforestación, cambios de uso de suelo y fragmentación paisajística, afecta la fertilidad, funcionalidad y comunidades microbianas, con un 45% de suelos degradados según SEMARNAT (Campuzano *et al*., 2022). Para contrarrestar este problema, los hongos ectomicorrízicos son una alternativa eficaz, ya que promueven el crecimiento vegetal, mejoran la fertilidad del suelo y aumentan la resistencia de plantas a condiciones adversas mediante simbiosis con raíces de coníferas, facilitando la absorción de nutrientes como fósforo y nitrógeno (Yan *et al*., 2025; Policelli *et al*., 2020). La inoculación con ectomicorrizas ha demostrado contribuir a la rehabilitación de suelos degradados en ecosistemas forestales (Martínez-Reyes *et al*., 2018).

La caracterización morfoanatómica de ectomicorrizas es clave para identificar especies fúngicas efectivas en la restauración, evaluando características como ramificación, color, textura y presencia de rizomorfos (Soto-Gil *et al*., 2022). El Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl (PNMFN), en Texcoco, Estado de México, enfrenta degradación por erosión y deforestación. En 2015, se reforestó con *Pinus greggii*, *P. oocarpa* y *P.*

maximartinezii inoculados con hongos ectomicorrízicos comestibles (*Laccaria laccata*, *Suillus kaibabensis*, *Hebeloma mesophaeum*).

Este estudio tuvo el objetivo de caracterizar morfoanatómicamente las ectomicorrizas en árboles inoculados para identificar especies fúngicas que favorezcan la recuperación de suelos degradados y el desarrollo de coníferas en el PNMFN.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en "El Jardín", un predio de aproximadamente 2 hectáreas ubicado en el Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl, Texcoco, Estado de México (19°30'N, 98°50'O). Esta área forestal periurbana se encuentra a 2,300 msnm, presenta clima templado subhúmedo con precipitación anual de 600-800 mm, y suelos tipo Andosoles y Regosoles caracterizados por erosión, compactación y presencia de tepetate (Hernández-López *et al.*, 2023; INEGI, 2020).

Mediante Sistemas de Información Geográfica se georreferenciaron los árboles inoculados (*P. greggii*, *P. oocarpa* y *P. maximartinezii*), registrando en julio de 2024 las características dendrométricas y fitosanitarias de cada ejemplar, para evaluar las interacciones fitobionte-micobionte (Flores *et al.*, 2022).

Se seleccionaron nueve árboles previamente inoculados con *Suillus kaibabensis*, *Laccaria laccata* y *Hebeloma mesophaeum*, de los cuales se extrajeron 36 muestras de suelo (cuatro por árbol) utilizando tubos de PVC (20 cm × 3 cm) colocados a tres cuartos del diámetro de copa en los puntos cardinales, conservándolas en papel aluminio (Soto-Gil *et al.*, 2022). Las raíces ectomicorrizadas se extrajeron sumergiendo los tubos en agua durante 24 horas y separándolas mediante tamices de 1.18 y 0.18 mm.

Posteriormente, se examinaron bajo microscopio estereoscópico (4×), se fotografiaron y almacenaron en tubos Eppendorf con solución alcohol-agua (30:70). Se realizaron cortes transversales de 10-15 µm, fijados con reactivo de Melzer y observados a 40×. La caracterización morfoanatómica se efectuó mediante claves DEEMY, describiendo puntas, manto y rizomorfos para identificar las interacciones simbióticas (Garibay-Orijel *et al.*, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables morfoanatómicas. Se evaluaron 61 árboles inoculados en “El Jardín”, registrando variables morfológicas como elevación, especie, altura total, diámetros basales, medios, de fuste y copa, y condición de follaje. Los datos de julio de 2024 reflejaron el desarrollo tras un incendio forestal: 34 árboles vivos, 8 con más del 70% de vitalidad, 14 muertos y 5 con más del 70% de daño. La forma del tronco fue predominantemente recta (48 árboles) con 13 inclinados, permitiendo evaluar su contribución a la rehabilitación ecosistémica.

Prevalencia de ectomicorrizas. Se confirmó la persistencia de hongos ectomicorrízicos (*S. kaibabensis*, *L. laccata*, *H. mesophaeum*) en árboles inoculados (*P. greggii*, *P. oocarpa*) mediante análisis morfoanatómico, detectando estructuras fúngicas en al menos dos tubetes por árbol tras casi diez años desde la plantación.

A) *P. greggii* con *S. kaibabensis*: Raíces juveniles con ramificación dicotómica, coloración naranja, 2 mm de longitud y escaso micelio externo (Figura 1a). En etapa madura adoptan forma coraloide, color café oscuro con puntas blanquecinas, 3-4 mm de longitud, con abundante micelio blanco (Figura 1b). El corte transversal muestra red de Hartig cubriendo tres capas corticales y manto externo desarrollado (Figura 1c) (Cardoso-Villanueva, 2023).

Esta interacción mejora la supervivencia hasta 89% en suelos degradados, favoreciendo la absorción de nutrientes y resistencia a condiciones adversas (Ortiz-Mendoza *et al*., 2021). El endemismo de *S. kaibabensis* en América del Norte y su compatibilidad con *P. greggii* refuerzan su viabilidad en suelos degradados (Martínez *et al.,* 2020).

B) *P. oocarpa* con *L. laccata*: Raíces juveniles con ramificación simple, color ocre-naranja con terminaciones blancas, 3 mm de longitud (Figura 1d). En etapa madura presentan ramificación dicotómica, color café oscuro con puntas blancas, 4-5 mm de longitud, con cordones miceliales (Figura 1e). El corte transversal revela red de Hartig cubriendo completamente las células corticales y el manto externo desarrollado (Figura 1f) (Zhang *et al*., 2023). La simbiosis mejora el crecimiento, la actividad microbiana en la rizosfera y la presencia de bacterias fijadoras de nitrógeno (Aguirre-Zamora *et al.,* 2021; Oliveira *et al.,* 2021). La ausencia de rizomorfos y presencia de cordones miceliales son características distintivas de *L. laccata* (Menéndez, 2016).

C) *P. oocarpa* con *H. mesophaeum*: Raíces juveniles con ramificación simple, color ocre-naranja, 3.5 mm de longitud, con cordones miceliales (Figura 1g). En etapa madura presentan ramificación dicotómica, color café oscuro uniforme, 4 mm de longitud, con micelio café oscuro (Figura 1h). El corte transversal muestra manto externo claro, red de Hartig cubriendo tres capas corticales y ausencia de hifas emanantes (Figura 1i). Esta interacción mejora el crecimiento, biomasa y absorción de nutrientes como fósforo, nitrógeno y potasio (Martínez-Reyes *et al.,* 2012). La adaptabilidad de *P. oocarpa* y su respuesta positiva a *H. mesophaeum* refuerzan la eficacia en suelos degradados (Romero-Sánchez *et al.,* 2023).

La inoculación con ectomicorrizas nativas demuestra ser una estrategia efectiva para la rehabilitación de suelos degradados, con persistencia incluso tras eventos adversos como incendios, apoyando la restauración de ecosistemas forestales en condiciones desafiantes.

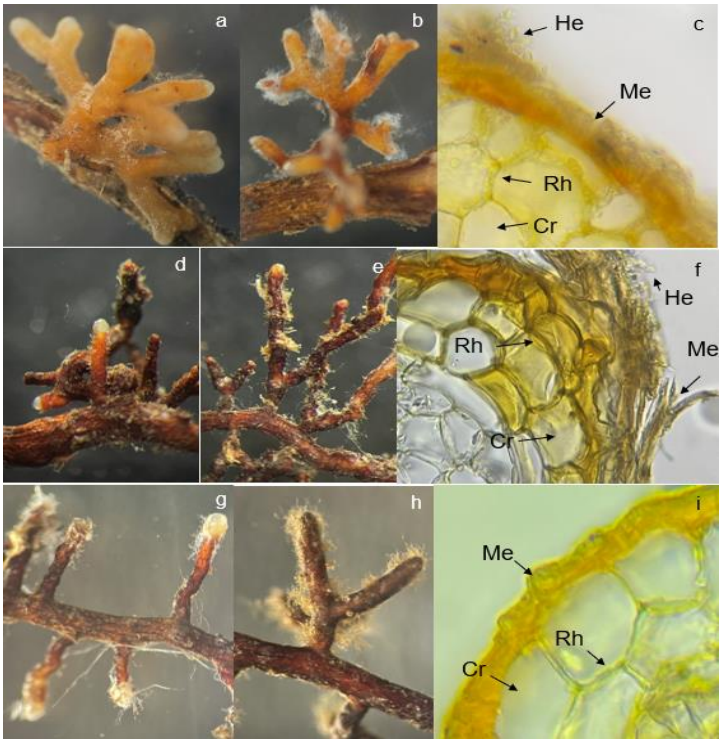


Figura 1. Características morfoanatómicas de las raíces ectomicorrizadas: a) Estructuras morfológicas juveniles de raíces de *Pinus greggii* Engelm. inoculadas con *Suillus kaibabensis* Thiers. b) Estructuras morfológicas adultas de raíces de *P. greggii* inoculadas con *S. kaibabensis*. c) Corte transversal de raíz micorrizada juvenil de *P. greggii* inoculada con *S. kaibabensis*. He = Hifas emanantes, Me = Micelio externo, Rh = Red de Hartig, Cr = Células corticales (100×). d) Estructuras morfológicas juveniles de raíces de *Pinus oocarpa* Schiede inoculadas con *Laccaria laccata* (Scop.) Cooke. e) Estructuras morfológicas adultas de raíces de *P. oocarpa* inoculadas con *L. laccata*. f) Corte transversal de raíz micorrizada adulta de *P. oocarpa* inoculada con *L. laccata*. g) Estructuras morfológicas juveniles de raíces de *Pinus oocarpa* Schiede inoculadas con *Hebeloma mesophaeum* (Pers.) Quél. h) Estructuras morfológicas adultas de raíces de *P. oocarpa* inoculadas con *H. mesophaeum*. **i)** Corte transversal de raíz micorrizada juvenil de *P. oocarpa* inoculada con *H. mesophaeum*.

CONLCUSIONES

Tras 9 años y 6 meses de reforestación en el Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl, los árboles de *Pinus greggii* y *P. oocarpa* inoculados con *Laccaria laccata*, *Suillus kaibabensis* y *Hebeloma mesophaeum* muestran estructuras ectomicorrízicas persistentes en sus raíces, confirmadas mediante caracterización morfoanatómica. Estos resultados evidencian la estabilidad de la simbiosis ectomicorrízica en el ecosistema rehabilitado. La inoculación con hongos ectomicorrízicos es clave para la restauración de suelos degradados. Se recomienda complementar con análisis de ADN para confirmar la identidad de las especies fúngicas y evaluar con mayor precisión su impacto en la recuperación de ecosistemas.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre-Zamora, M., Pérez-Moreno, J., López-Lozano, N. E., Barragán-Soriano, J.L. & Delgadillo-Martínez, J. (2021). La inoculación de *Pinus greggii* con el hongo ectomicorrícico *Laccaria laccata* favorece a las comunidades nativas de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal. *Biotecnia*, *23*(2). https://doi.org/10.18633/biotecnia.v23i2.1302.

Campuzano, E.F., Briones, O., Larsen, J., Guillén-Cruz, G., Fernández-Luqueño, F. & Flores-Rentería, D. (2022). Procedimiento para evaluar la degradación biológica del suelo en zonas áridas del noreste de México. *Realidad, datos y espacio. Revista internacional de estadística y geografía*, *13*(1).

Cardoso-Villanueva, M. D. R. (2023). Cultivo del hongo comestible *Suillus kaibabensis* Thiers. asociado con *Pinus greggii* Engelm. en campo y seguridad alimentaria.

Flores, J. G., & Reyes Cárdenas, O. (2022). Cultivo del hongo comestible *Suillus kaibabensis* Thiers. asociado con *Pinus greggii* Engelm. en campo y seguridad alimentaria. *Revista De Geografía Agrícola*, (69), 81–94.

Garibay-Orijel, R., Morales-Marañon, E., Domínguez-Gutiérrez, M., & Flores-García, A. (2013). Caracterización morfológica y genética de las ectomicorrizas formadas entre *Pinus montezumae* y los hongos presentes en los bancos de esporas en la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista mexicana de biodiversidad*, *84*(1), 153-169. https://doi.org/10.7550/rmb.29839.

Hernández-López, P., Martínez-Trinidad, T., Hernández-de la Rosa, P., Mohedano-Caballero, L. & González-Guillén, M. de J. (2023). Caracterización ecológica del arbolado del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *29*(3), 93–108.

INEGI (2020). Conjunto de Datos Vectoriales de Edafología. Serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825235659.

Martínez, A., Díaz, J., Manzanilla-Quiñones, U., Becerra-López, J., Hernández-Herrera, J., Estrada-Ávalos, J. & Velázquez-Pérez, A. (2020). Spatial modeling of the ecological niche of *Pinus greggii* Engelm. (Pinaceae): a species conservation proposal in Mexico under climate change scenarios. *iForest - Biogeosciences and Forestry*.

Martínez-Reyes, M., Pérez-Moreno, J., Villarreal-Ruiz, L., Ferrera-Cerrato, R., Xoconostle-Cázares, B., Vargas-Hernández, J. J., & Honrubia-García, M. (2012). Crecimiento y contenido nutrimental de *Pinus greggii* Engelm. inoculado con el hongo comestible ectomicorrízico *Hebeloma mesophaeum* (Pers.) Quél. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *18*(2), 183-192. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.112.

Menéndez Valderrey, J.L. (2016). *Laccaria laccata*. *Asturnatura*. Recuperado el 29 de marzo de 2025, de https://www.asturnatura.com.

Olivera, J.A.V., Pérez-Moreno, J., Viveros, G.S., Reyes, M.M., Castillo, G. A., Suarez, J. J. A. & Cabrera, C.R.C. (2021). Mycelial disturbance stimulates the formation of sporomes of edible ectomycorrhizal fungi associated with two neotropical pines: Micelial disturbance stimulates edible ectomycorrhizal mushrooms. *Agro Productividad*, *14*(2).

Ortiz-Mendoza, R., Aguirre-Calderón, Ó., Gómez-Cárdenas, M., Treviño-Garza, E. & González-Tagle, M. (2021). Crecimiento de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en suelos degradados de la Mixteca Alta, Oaxaca. *12*.

Policelli, N., Horton, T., Hudon, A., Patterson, T. & Bhatnagar, J. (2020). Back to Roots: The Role of Ectomycorrhizal Fungi in Boreal and Temperate Forest Restoration. *3*. https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00097.

Romero-Sánchez, M., Velasco-García, M., Pérez-Miranda, R., Velasco-Bautista, E., & González-Hernández, A. (2022). Diferentes enfoques de modelación para determinar áreas adecuadas para la conservación de árboles de pino cónico (*Pinus oocarpa* Schiede) plus en la parte central de México. *Bosques*. https://doi.org/10.3390/f13122112.

Soto-Gil, Ana Lucila, Velázquez-Martínez, Alejandro, Pérez-Moreno, Jesús, Fierros-González, Aurelio Manuel, & Martínez-Reyes, Magdalena. (2022). Morfotipos ectomicorrícicos en retención estructural variable de *Pinus patula* Schltdl et Cham. *Madera y bosques*, *28*(2), e2822388. Epub 14 de abril de 2023.

Yan, X., Zhou, L., Chen, Y., Liu, R., Guo, L., Li, N., Kang, A., Zhai, K., Zhou, G. & Zhou, X. (2025). Ectomycorrhizal fungi explain more variation in rhizosphere nutrient availability than root traits in temperate forests. *Applied Soil Ecology*. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105923.

Zhang, M., Gao, X. L., Mu, L. Q. & Deng, W. Q. (2023). Morphology and molecular phylogeny reveal five new species of *Laccaria* (Hydnangiaceae, Agaricales) from Southern China. *Journal of Fungi*, *9*(12), 1179.

EVALUACIÓN INTEGRAL DE LAS NANOPARTÍCULAS DE HIERRO EN MAÍZ Y LOMBRICES DE TIERRA

Hermes Pérez Hernández[1]

[1] Campo Experimental Edzná, CIRSE, INIFAP

Correo del autor de correspondencia: hermesph@hotmail.com

RESUMEN

Existe debate sobre el efecto de nanopartículas en plantas comestibles y organismos del suelo. Las lombrices se usan para evaluar calidad del suelo, reproducción y supervivencia frente a nanomateriales, aunque la mayoría de los estudios son en laboratorio y pocos en condiciones realistas donde lombrices y maíz comparten suelo y materia orgánica. Este estudio evaluó concentraciones de 10, 100, 200, 400 y 800 mg kg^{-1} de nanopartículas de Fe (magnetita y hematita) en el crecimiento de *Zea mays* y la reproducción de *Eisenia fetida* durante 110 días. Concentraciones de 100 y 400 mg kg^{-1} mejoraron parámetros morfológicos y de rendimiento en maíz, mientras que 400 y 800 mg kg^{-1} redujeron poblaciones de lombrices, pero aumentaron juveniles. El enfoque de evaluación holística mostró que las NP de Fe pueden bioestimular el maíz e influir en la reproducción de lombrices, aunque se requiere evaluar su efecto a largo plazo para descartar riesgos ecológicos en sistemas agrícolas.

PALABRAS CLAVE: *Eisenia fetida; hierro; nanopartículas; nanotoxicología; Zea mays.*

INTRODUCCIÓN

La aplicación de la nanotecnología en la agricultura ha cobrado relevancia mundial por sus efectos en los parámetros fisiológicos y bioquímicos de las plantas comestibles. Su eficacia depende principalmente del tamaño de las nanopartículas (NP), definidas como partículas de 1 a 100 nm, y de propiedades únicas como la forma, la relación superficie-volumen y la carga superficial, que influyen en el rendimiento y la calidad de los cultivos (Ma *et al*., 2018). La degradación del suelo restringe la absorción de agua y nutrientes, afectando el desarrollo de las plantas en las etapas germinativa, vegetativa y reproductiva. En suelos calcáreos, el hierro (Fe) es insoluble en su forma oxidada, lo que reduce su disponibilidad (Ghassemi-Golezani y Abdoli, 2021). Al ser un elemento redox activo y potencialmente tóxico, su concentración intracelular debe regularse estrictamente. El Fe es esencial en la actividad enzimática, la formación de proteínas y la síntesis de clorofila. Las alteraciones fisicoquímicas del suelo pueden disminuir aún más su solubilidad, provocando cambios fisiológicos en las plantas (Zia-ur-Rehman *et al*., 2023).

Las NP de Fe representan una alternativa viable para mejorar el crecimiento vegetal. La absorción de Fe es un factor limitante en la producción de biomasa. Como biofertilizantes, las NP de Fe son prometedoras por su bajo costo y toxicidad. Sin embargo, su acumulación en el suelo plantea preocupaciones ecológicas. Se ha

demostrado que el uso excesivo de NP puede dañar a plantas y a los organismos del suelo (Pérez-Hernández *et al.,* 2021). Por ejemplo, NP de Fe_3O_4 a 54 µM mejoraron el crecimiento del maíz y redujeron enzimas antioxidantes, mientras que dosis de 100 mg kg^{-1} aumentaron biomasa y clorofila, pero redujeron la diversidad bacteriana (Zhang *et al.,* 2021). Asimismo, concentraciones elevadas (15 g kg^{-1}) provocaron mortalidad e inhibición reproductiva en lombrices de tierra y dosis menores también indujeron estrés oxidativo (Zhang *et al*., 2021), probablemente debido al tamaño, forma y carga superficial de las NP. Los efectos varían según el entorno experimental, la textura del suelo, la materia orgánica, el tipo y dosis de NP, el organismo y el tiempo de exposición. Por ello, su uso responsable es fundamental, especialmente ante la biodiversidad de micro y macroinvertebrados del suelo (Pérez-Hernández *et al.,* 2021). La mayoría de los estudios evalúan plantas y organismos del suelo por separado y en periodos breves (14-60 días). Por tanto, es necesario estudiar los efectos a largo plazo en espacios y tiempos compartidos. Se cultivó maíz durante 110 días en suelo natural con materia orgánica para evaluar el impacto de NP de Fe_2O_3 y Fe_3O_4 sobre parámetros de crecimiento y rendimiento del maíz, así como el crecimiento y reproducción de lombrices de tierra. Además, se analizaron las concentraciones de Fe en las lombrices de tierra.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio y materiales utilizados: El experimento tuvo una duración de 110 días y se realizó de abril a julio del 2023 en el invernadero del Departamento de Botánica de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Saltillo, Coahuila, México. Las semillas de maíz (*Zea mays* L. var. AN-447) fueron proporcionadas por la UAAAN. El suelo fue de textura franco-arenosa con 0.8% de materia orgánica, pH de 8.03 y una conductividad eléctrica de 0.628 dS m^{-1}.

Del área agroecológica de la UAAAN, se recolectaron lombrices de tierra adultas (*E. fetida*), las cuales tuvieron un peso promedio de 0.35 ± 0.06 g. Enseguida, para la aclimatación, previo al experimento, se colocaron en macetas con materia orgánica durante 15 días. Las nanopartículas de Fe se obtuvieron de "ID Nano", San Luis Potosí, las cuales presentaron un rango de tamaño de 10 a 75 nm, con forma esférica y su presencia en forma de magnetita (Fe_3O_4) y hematita (α-Fe_2O_3).

Configuración y manejo del experimento en plantas de maíz: Se sembraron tres semillas de maíz en macetas de plástico con 8 kg de suelo combinado con materia orgánica (3:1 v/v). A los cinco días después de la siembra, se realizó un raleo dejando una planta. Durante los primeros 30 días, las plantas se regaron diariamente y posteriormente hasta dos días antes de la cosecha, se aplicó una solución nutritiva Steiner al 25%, sin hierro, junto con el riego; el hierro se aportó solo mediante tratamientos. Se aplicaron cinco tratamientos, incluyendo un control (agua), con diez réplicas. Las concentraciones de Fe NP fueron de 10, 100, 200, 400 y 800 mg kg^{-1} de suelo seco. Las nanopartículas de Fe se aplicaron como una suspensión: las nanopartículas se sonicaron durante 30 minutos en agua desionizada, se ajustaron a 1000 mL y se agregaron en cada una de las réplicas de cada tratamiento (Pérez-Hernández *et al.,* 2021).

Configuración y manejo del experimento en lombrices de tierra *E. fétida:* Además de las plantas de maíz, cada maceta sirvió como unidad experimental para evaluar el efecto de las NP de Fe en el crecimiento y la reproducción de *E. fetida*. Para proporcionar hábitat y alimento, se añadió una capa de 8 cm de materia orgánica. Cinco días después de la aplicación de las NP de Fe, y cuando las plantas alcanzaron los 20 cm, se introdujeron 20 lombrices adultas cliteladas. Plantas y lombrices coexistieron durante todo el experimento.

Muestro en plantas y lombrices: Al momento de la cosecha (110 días), se midió el peso fresco y seco de raíces, el peso fresco y seco de la mazorca, y el peso seco de los granos por mazorca. Se utilizó una báscula digital para el peso.

Asimismo, a los 110 días, se extrajeron las lombrices de tierra (*E. fetida*) de la capa de materia orgánica (MO) y del suelo. Se separaron en adultas y juveniles, se lavaron con agua desionizada. Posteriormente, se contaron las lombrices según su etapa de desarrollo (adultos o juveniles) y se pesaron.

Análisis del contenido de Fe en lombrices: El contenido de Fe en lombrices se determinó siguiendo la metodología reportada por Pérez-Hernández *et al*. (2021). Las muestras se molieron a 150 µm y se tomaron 0.10 g para digestión con 8 mL de HNO_3 (69%), 5 mL de H_2O_2 (30%) y 3 mL de HCl (36%) en vaso de precipitados de vidrio. La mezcla se calentó con agitación a 180 °C por 1.5 h, se añadieron 25 mL de agua desionizada y se filtró con papel Whatman n.° 41, ajustando a 100 mL. El Fe se midió por plasma acoplado inductivamente (ICP) en un Perkin Elmer Optima 8300.

Análisis estadístico: Se realizó un ANOVA de una vía utilizando el modelo lineal general (GLM) para evaluar el efecto de las NP de Fe en los parámetros de crecimiento y rendimiento del maíz, así como en la reproducción y acumulación de Fe en las lombrices. Cuando se presentaron diferencias significativas, se compararon las medias utilizando la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Antes del análisis de datos, se probó la normalidad (prueba de Shapiro) y la homocedasticidad (prueba de Levene). El análisis estadístico se realizó con el software Minitab 20.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de las NP de Fe sobre los parámetros agronómicos y el rendimiento del maíz. En este estudio, 10, 100 y 400 mg kg^{-1} de NP de Fe aumentaron el peso fresco y seco de raíces (Cuadro 1). Las NP evaluadas en este estudio midieron 63.9 nm, lo que podrían ser absorbidas por las raíces, ya que los pelos radiculares liberan compuestos orgánicos con carga negativa que atraen NP cargadas positivamente, facilitando su acumulación. Estas pueden penetrar por la epidermis de raíces secundarias y terciarias, atravesar el xilema y generar nuevos poros en la membrana plasmática, provocando cambios en crecimiento y rendimiento vegetal (Zia-ur-Rehman *et al.,* 2023). Adicionalmente, a 400 mg kg^{-1} de NP de Fe se vio mejorado el peso húmedo y seco de la mazorca y el peso de grano, mientras que otras concentraciones no mostraron igual efecto en el rendimiento (Cuadro 1). Otros estudios confirman que 10–400 mg kg^{-1} de NP de Fe pueden favorecer el rendimiento, aunque no en todos los parámetros. El Fe es esencial en la división celular y su deficiencia limita el crecimiento y la acumulación de proteína en la semilla, reduciendo tamaño y

rendimiento (Ma *et al.,* 2018). Así, las NP de Fe aplicadas al suelo pueden ingresar mediante exudados radicales y ser absorbidas por canales iónicos o proteínas transportadoras, influyendo en parámetros agronómicos de interés (Ghassemi-Golezani y Abdoli, 2021). Lo anterior sugiere que el Fe nanométrico actuó como bioestimulante y nanonutriente, mejorando el peso fresco y seco de raíces y el rendimiento del maíz (Zhang *et al.,* 2021; Pérez-Hernández *et al.,* 2021).

Cuadro 1. NPs de hierro en los parámetros morfológicos y de rendimiento del maíz.

Tratamientos (mg kg^{-1} de suelo seco)	Peso fresco de raíz (g)	Peso seco de raíz (g)	Peso fresco de mazorca (g)	Peso seco de mazorca (g)	Peso seco de granos por mazorca (g)
Control (0)	256.0±10.5 b*	32.0±1.65 b	283.3±10.9 ab	105.11±7.05 ab	64.56±6.76 ab
10	313.1±25.1 a	39.6±2.51 a	264.2±12.9 ab	78.22±9.42 c	36.89±7.14 c
100	275.8±23.5 a	33.2±2.56 ab	254.5±12.7 b	88.78±7.28 bc	45.78±7.73 bc
400	329.7±24.4 a	33.5±3.06 ab	297.0±7.53 ab	118.44±1.94 a	75.67±3.44 a
800	216.2±12.7 b	26.8±2.65 b	308.9±14.2 a	108.38±6.52 ab	67.88±5.83 ab

* Valores con diferente literal indica diferencia significativa entre tratamientos (Tukey, ≤ 0.05).

Efecto de las NP de Fe sobre el crecimiento y contenido de Fe en las lombrices. Tras 110 días de exposición a las NP de Fe, la población adulta de lombrices de tierra disminuyó significativamente con 100, 400 y 800 mg kg^{-1}, en un 70.74%, 25.53% y 35.63%, respectivamente, respecto al control. En contraste, el peso de los juveniles aumentó un 255.78% y 336.8% con 400 y 800 mg kg^{-1}, respectivamente. El peso total solo disminuyó significativamente con 100 mg kg^{-1}. Aunque 400 y 800 mg kg^{-1} mostraron valores mayores que 10 y 100 mg kg^{-1}, las diferencias no fueron significativas. Los resultados sugieren que la presencia y el contenido de minerales, materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico, conductividad eléctrica, pH del suelo, entre otros factores, pueden influir en la disponibilidad y destino de las NP y, en consecuencia, una vez que las NP entran en el organismo, pueden potenciar su efecto tóxico (Pérez-Hernández *et al.,* 2021).

Cuadro 2. NPs de hierro en parámetros de crecimiento, peso y concentración de Fe en lombrices *E. fetida.*

Tratamientos (mg kg^{-1} de suelo seco)	Adultos	Juveniles	Peso total (g)	Concentración de Fe (mg kg^{-1} de peso seco)
Control (0)	18.8 ± 0.45 a*	19.0 ± 4.73 c	7.9 ± 0.61 a	664.0± 16.0 c
10	16.8 ± 0.70 ab	34.1 ± 8.45 bc	7.6 ± 0.90 a	780.0 ± 46.0 bc
100	5.50 ± 2.33 c	21.5 ± 8.56 c	2.8 ± 0.94 b	892.0 ± 28.0 b
400	14.0 ± 0.71 b	67.6 ± 10.8 ab	9.4 ± 0.57 a	804.0 ± 35.2 bc
800	12.1 ± 1.03 b	83.0 ± 9.10 a	9.2 ± 0.98 a	1180.0 ± 61. a

* Valores con diferente literal indican diferencia significativa entre tratamientos (Tukey, ≤ 0.05).

Estudios previos indican que a bajas concentraciones (50–150 mg kg^{-1}) las lombrices no detectan las NP, consumen el sustrato y con el tiempo presentan efectos en crecimiento, reproducción o mortalidad. En este estudio, el peso inicial fue 0.35 ± 0.06 g; al final, solo 100 mg kg^{-1} mostró reducción significativa. Aunque 400 y 800 mg kg^{-1} no

difirieron del control, ligeras variaciones podrían deberse a deficiencias de micronutrientes (Zhang *et al.,* 2021). Los tratamientos con NP aumentaron la concentración de Fe en lombrices, siendo mayor con 800 mg kg^{-1}, con valores 76% superiores al control (Cuadro 2). Aunque la alta concentración de NP determinó el Fe acumulado, el efecto sobre la reproducción contradijo nuestra hipótesis: la proporción de juveniles aumentó con 400 y 800 mg kg^{-1}. Esto sugiere un efecto negativo inicial que no persistió. Estudios previos señalan que las NP metálicas pueden dañar a las lombrices entre 1 y 90 días, pero luego envejecen, pierden toxicidad y los iones liberados pueden suplir deficiencias, aportando Fe y mejorando la supervivencia. En el control, la baja fertilidad y pérdida de peso podrían relacionarse con reservas energéticas reducidas (Zhang *et al.,* 2021). En conjunto, los resultados muestran que las NP de Fe pueden modificar la población de *E. fetida* y, bajo ciertas condiciones, favorecer su reproducción según materia orgánica, alimento, concentración y tiempo de exposición.

CONCLUSIONES

Las concentraciones de 100–400 mg kg^{-1} mejoraron el peso seco de raíz, el peso fresco y seco de la mazorca y el peso seco de granos. En las lombrices, la concentración de 400 y 800 mg kg^{-1} redujo la población en un 35%, aunque a la misma concentración aumentaron los juveniles. La respuesta positiva a bajas y medias concentraciones sugiere que el hierro puede estimular el rendimiento del maíz y la reproducción de las lombrices *E. fetida*. Enfoques holísticos permitirán comprender los posibles riesgos de los nanomateriales en la agricultura.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti), México.

BIBLIOGRAFÍA

Ghassemi-Golezani, K. & Abdoli, S. (2021). Improving ATPase and PPase activities, nutrient uptake and growth of salt stressed ajowan plants by salicylic acid and iron-oxide nanoparticles. *Plant Cell Reports*. 40(3), 559-573

Ma, C., White, J. C., Zhao, J., Zhao, Q. & Xing, B. (2018). Uptake of engineered nanoparticles by food crops: Characterization, mechanisms, and implications. *Annual Review of Food Science and Technology*. 9(1), 129-153. https://doi.org/10.1146/annurev-food-030117-012657

Pérez-Hernández, H., Fernández-Luqueño, F., Huerta-Lwuanga, E., Mendoza-Vega, J., Álvarez-Solís, J.L., Hernández-Gutiérrez, E., Vave-Mora, J.F. & Pérez-Sato, M. (2020). The first evidence of accumulation and avoidance behavior of macroinvertebrates in a forest soil spiked with human-made iron nanoparticles: A field experiment. *Heliyon*, 6(9), e04860. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04860

Zhang, F., He, M., Zhang, C., Lin, D. & Zhang, J. (2021). Combined toxic effects of dioxin-like PCB77 with Fe-based nanoparticles in earthworm *Eisenia fetida*. *Science of the total environment*. 766, 144347

Zia-ur-Rehman, M., Mfarrej, M. F. B., Usman, M., Anayatullah, S., Rizwan, M., Alharby, H. F., Abu Zeid, I. M., Alabdallah, N. M. & Ali, S. (2023). Effect of iron nanoparticles and conventional sources of Fe on growth, physiology and nutrient accumulation in wheat plants grown on normal and salt-affected soils. *Journal Hazardous Materials*. 458, 131861

REFORESTACIÓN CON ÁRBOLES ECTOMICORRIZADOS EN SUELOS DEGRADADOS CON PRESENCIA DE TEPETATE

Elizabeth Hernández Acosta[1,2]; Dafne Fernanda Juárez Zavala[2]; Jesús Pérez Moreno[3]; Carlos Leopoldo Cíntora González[2]; Magdalena Martínez Reyes [3]

[1,2] Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.
[2] División de Ciencias Forestales, Posgrado en Ciencias Forestales y del Ambiente, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.
[3] Programa Edafología. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Montecillos, Texcoco, Estado de México, México.

Correo del autor de correspondencia: ehernandeza@chapingo.mx

RESUMEN

La pérdida de calidad del suelo en ecosistemas forestales afecta los servicios ecosistémicos que estos proveen. En México, aproximadamente el 45% de los suelos presentan algún grado de deterioro físico o químico. Entre las prácticas aplicadas para contrarrestar la degradación se encuentra la reforestación con árboles previamente inoculados con hongos ectomicorrízicos, los cuales mejoran la absorción de agua y nutrientes al expandir el sistema radical y aumentar la tolerancia al estrés. En los bosques del Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl, revertir la degradación del suelo es relevante, debido a la importancia de estos espacios en la regulación climática, la conservación del agua y la biodiversidad, así como en la protección contra la erosión. En este trabajo se evaluó el desempeño de árboles inoculados con hongos ectomicorrízicos en la restauración de suelos con tepetate, nueve años después de su plantación. Se analizaron siete propiedades físicas y químicas del suelo tanto en la zona de goteo de los árboles como en puntos de control cercanos ubicados a 50 cm de distancia, con el objetivo de determinar el efecto de los árboles en el proceso de restauración del suelo. Los resultados muestran mejoras en diversas propiedades físicas y químicas del suelo, como la estabilidad estructural, la disponibilidad de nutrientes y el balance del pH, atribuibles al establecimiento de árboles inoculados con hongos ectomicorrízicos. Esta estrategia de reforestación representa una contribución significativa en los procesos de recuperación de suelos degradados en áreas naturales protegidas, donde el equilibrio ecológico es fundamental para mantener los servicios ambientales que benefician a las comunidades humanas.

PALABRAS CLAVE: *Hongos ectomicorrízicos; propiedades del suelo; restauración de suelo*.

INTRODUCCIÓN

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) desempeñan un papel fundamental en la conservación de los ecosistemas forestales, especialmente en aquellos afectados por actividades humanas. Las ANP destacan por su papel en la protección de la biodiversidad, el equilibrio climático y el resguardo de los recursos naturales.

Sin embargo, a pesar de su relevancia legal y ecológica, muchas ANP enfrentan procesos acelerados de degradación del suelo, deforestación y erosión, lo que compromete su capacidad para sostener los servicios ecosistémicos que brindan. En México, esta problemática se manifiesta en diversos territorios protegidos, donde la presión antrópica deteriora la estructura y funcionalidad del suelo, afecta la regeneración natural de la vegetación y altera la dinámica ecológica de los sistemas naturales (CONANP, 2020). La efectividad de las áreas naturales protegidas depende de la implementación de acciones que garanticen su restauración y mantenimiento ecológico. Por ello, la recuperación de ecosistemas forestales degradados requiere estrategias específicas que no sólo restablezcan la cobertura vegetal, sino que también promuevan la recuperación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (CONAFOR, 2020).

Entre las técnicas de restauración ecológica, la reforestación es una de las más empleadas debido a su eficacia. Cuando se realiza con árboles ectomicorrizados, adquiere mayor relevancia, ya que la inoculación con hongos ectomicorrízicos favorece el establecimiento de plántulas al mejorar la absorción de nutrientes y agua, además de aumentar su tolerancia al estrés ambiental (Aguirre-Zamora *et al*., 2021). Así, su incorporación no solo mejora el desempeño fisiológico de los árboles, sino que también contribuye al restablecimiento de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo.

El Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl (PNMFN), ubicado en el municipio de Texcoco, Estado de México, es un ejemplo de área natural protegida que presenta procesos de deterioro como deforestación, erosión del suelo y exposición de capas endurecidas del suelo como los tepetates (INEGI, 2020). En respuesta a estas condiciones, en el año 2015 se llevó a cabo una reforestación con especies de *Pinus greggii* Engelm., *P. oocarpa* Schiede y *P. maximartinezii* Rzedowski inoculados con hongos ectomicorrízicos comestibles de las especies *Laccaria laccata* (Scop.) Cooke, *Suillus kaibabensis* Thiers y *Hebeloma mesophaeum* (Pers.) Quél.

A partir de esta tarea, se considera necesario evaluar la efectividad de la reforestación con árboles ectomicorrizados. Por ello, el presente estudio tuvo como objetivo caracterizar las propiedades físicas y químicas del suelo en el PNMFN, nueve años después de dicha reforestación, para determinar su impacto en la recuperación de las propiedades edáficas como parte del proceso de restauración ecológica.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el predio conocido como “El Jardín”, con una extensión aproximada de 2 hectáreas, ubicado dentro del Parque Nacional Molino de Flores Nezahualcóyotl, en el municipio de Texcoco, Estado de México (19°30'N, 98°50'O). Esta zona forestal periurbana, situada a 2,300 msnm, presenta un clima templado subhúmedo, con una precipitación anual que oscila entre 600 y 800 mm. Los suelos predominantes son Andosoles y Regosoles, los cuales muestran signos de erosión, compactación y presencia de tepetate (Hernández-López *et al*., 2023; INEGI, 2020). A través de Sistemas de Información Geográfica se georreferenciaron los árboles inoculados de *Pinus greggii*, *P. oocarpa* y *P. maximartinezii*.

El muestreo de suelo se realizó en agosto de 2024, coincidiendo con la temporada de lluvias, periodo en el que la cobertura vegetal alcanza su mayor desarrollo. Se seleccionaron aleatoriamente 25 árboles ectomicorrizados de un total de 61 previamente georreferenciados, y se recolectaron muestras del suelo directamente asociado a su sistema radical. Además, se tomaron muestras adicionales a una distancia de 2 metros de cada árbol (suelo circundante), con el objetivo de comparar las propiedades físicas y químicas entre ambos tipos de suelo, diferenciando así el efecto de la micorrización.

En total se obtuvieron 50 muestras, las cuales fueron procesadas en laboratorio. Cada muestra fue secada, tamizada y sometida a análisis para determinar las siguientes propiedades: pH, conductividad eléctrica, densidad aparente, nitrógeno inorgánico (N*i*), textura (método de Bouyoucos), fósforo disponible para suelos neutros y alcalinos (método de Olsen) y fósforo extraíble en suelos neutros y ácidos (método de Bray y Kurtz). Todos los procedimientos analíticos se realizaron conforme a lo establecido en la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002).

Para el análisis estadístico de los datos, se identificaron las variables a comparar entre las dos condiciones de suelo: el sistema radical de árboles ectomicorrizados y suelos a distancia. Posteriormente, se aplicó la prueba estadística no paramétrica de Wilcoxon.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De todas las variables analizadas, sólo el nitrógeno inorgánico presentó diferencia estadísticamente significativa, desde el punto de vista estadístico. Además, ni la conductividad eléctrica ni el contenido de materia orgánica presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los suelos asociados a árboles ectomicorrizados y los suelos a distancia ($p > 0.05$). Esta similitud podría indicar que el efecto de la micorrización aún no se manifiesta en estas variables, o bien que requiere un mayor tiempo de exposición para hacerlo en suelos con presencia de tepetate (Cuadro 1).

Cuadro 1. Medianas y comparación estadística de las propiedades físicas y químicas del suelo mediante la prueba de Wilcoxon.

	Medianas		**Estadístico de Wilcoxon**	**p-value**
	Suelos del sistema radical de árboles micorrizados	**Suelos a distancia del árbol micorrizado**		
Nitrógeno inorgánico (N_i) (ppm)	15.517	9.800	123.500	0.0002
Conductividad eléctrica ds m^{-1}	0.0003	0.0006	-61.500	0.0986
pH	6.78	6.71	43.000	0.2553
Densidad aparente (g cm^3)	1.094	1.088	16.000	0.0676
Fósforo según pH (mg kg^{-1})	18.365	14.233	52.000	0.1406
Materia orgánica (%)	1.557	1.6435	-54.500	0.0980

En cuanto al contenido de nitrógeno inorgánico (N*i*), los suelos asociados directamente a las raíces de árboles ectomicorrizados presentaron concentraciones promedio más elevadas (15.517 mg Kg^{-1}), en comparación con los suelos recolectados a distancia (9.800 mg Kg^{-1}). Según la NOM-021-RECNAT-2000, estos valores se clasifican en las categorías

bajo y muy bajo, respectivamente. Esta diferencia sugiere que la presencia de hongos ectomicorrízicos favorece la disponibilidad de nitrógeno en la rizosfera (Hawkins y Robbins, 2022). Diversos estudios han demostrado que las ectomicorrizas no solo mejoran la absorción de nitrógeno por parte de las plantas, sino que también estimulan la mineralización de materia orgánica y modifican la comunidad microbiana del suelo, promoviendo procesos de ciclado de nutrientes (Bahram *et al*., 2022).

La textura del suelo en la zona de influencia directa del sistema radical de árboles ectomicorrizados fue franco arenosa, lo que sugiere una mayor proporción de arena con cantidades moderadas de limo y arcilla. Esta condición favorece la aireación y el drenaje, condiciones que promueven el desarrollo de la raíz y la actividad microbiana. En contraste, los suelos recolectados a mayor distancia mostraron una mayor diversidad textural, identificándose las clases franco arenosa, areno francosa y franca, lo que podría estar relacionado con la menor influencia biológica directa y la variabilidad en la cobertura vegetal (Jiang *et al*., 2020).

El pH promedio del suelo en la rizosfera de árboles ectomicorrizados y en los suelos a distancia fue neutro (6.78 y 6.71, respectivamente), de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000. Aunque esta diferencia no fue estadísticamente significativa, ambos valores se encuentran dentro de un rango que favorece la disponibilidad de nutrientes. Si bien las ectomicorrizas pueden influir en el pH del suelo mediante la liberación de compuestos orgánicos como ácidos carboxílicos y enzimas (Smith y Read, 2018), en este estudio no se observó una modificación significativa atribuible a su presencia.

La densidad aparente en los suelos del sistema radical de árboles ectomicorrizados y los suelos a distancia mostraron medianas muy similares, de 1.094 y 1.088 g/cm^3, respectivamente, lo que indica una estructura más suelta y porosa. Aunque la diferencia es mínima, podría estar influida por la mayor acumulación de materia orgánica y la actividad biológica en la rizosfera, particularmente por la acción de las ectomicorrizas, que contribuyen a la agregación del suelo mediante la producción de exudados y la interacción con microorganismos edáficos (Weil y Brady, 2016).

El fósforo disponible en los suelos del sistema radical de árboles ectomicorrizados (18.365 mg kg^{-1}) y los suelos a distancia (14.233 mg kg^{-1}), presentaron medianas que se ubican en los rangos de contenido medio y bajo, respectivamente, según la NOM-021-SEMARNAT-2000. Los suelos con árboles ectomicorrizados mostraron el valor más alto, lo que sugiere una mayor estabilidad en la disponibilidad de fósforo. Esta condición puede atribuirse a la acción de los hongos ectomicorrízicos, que movilizan el fósforo del suelo mediante la secreción de enzimas fosfatasas y ácidos orgánicos, facilitando su absorción por las raíces (Pérez-Moreno y Read, 2021).

CONCLUSIONES

Este estudio subraya la importancia de la reforestación con árboles ectomicorrizados como una herramienta que puede utilizarse en la restauración de suelos degradados. La caracterización de propiedades físicas y químicas del suelo permitió identificar que, si bien la mayoría de los indicadores no mostraron diferencias estadísticamente significativas, el contenido de nitrógeno inorgánico fue significativamente mayor en los

suelos asociados a árboles micorrizados. La estructura del suelo, el pH y el fósforo también mostraron tendencias favorables.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección General de Investigación, Posgrado y Servicio y al DEIS en Suelos, de la Universidad Autónoma Chapingo, por el financiamiento y apoyo brindado para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre-Zamora, C., Truong, C. & Pérez-Moreno, J. (2021). Hongos ectomicorrízicos asociados a plantas jóvenes de Pinus patula y Quercus crassifolia en plantaciones del sistema matarrasa de la Sierra Juárez de Oaxaca, México. *Scientia Fungorum*, 51, e1289. https://www.researchgate.net/publication/349652833.

Bahram, M., Netherway, T., Hildebrand, F. & Tedersoo, L. (2022). Ectomycorrhizal fungi mediate nutrient cycling and soil structure in forest ecosystems. *Nature Ecology & Evolution*, 6(3), 327–336. https://doi.org/10.1038/s41559-021-01640-5.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (conanp). (2020). *Resiliencia Áreas Naturales Protegidas: Soluciones naturales a retos globales*. CONANP. https://www.conanp.gob.mx/ProyectoResiliencia/ResilienciaANP_SolucionesNaturalesARetosGlobales.pdf

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2020). Estrategia Nacional de Restauración Forestal 2020–2024. Gobierno de México. https://www.gob.mx/conafor/documentos/estrategia-nacional-de-restauracion-forestal-20202024.

Hawkins, B. J. & Robbins, S. (2022). Comparison of ammonium, nitrate, and proton fluxes in mycorrhizal and nonmycorrhizal roots of lodgepole pine in contrasting nitrogen treatments. *Canadian Journal of Forest Research*, *52*(9), 1245-1253. https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0066.

Hernández-López, P., Martínez-Trinidad, T., Hernández-de la Rosa, P., Mohedano-Caballero, L. & González Guillén, M. de J. (2023). Caracterización ecológica del arbolado del Parque Nacional Molino de Flores Netzahualcóyotl. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 29(3), 93–108. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2023.01.002.

INEGI (2020). Conjunto de Datos Vectoriales de Edafología. Serie II. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha. html?upc=702825235659

Jiang, P., Ding, W., Yuan, Y. & Ye, W. (2020). Diverse response of vegetation growth to multi-time-scale drought under different soil textures in China's pastoral areas. *Journal of Environmental Management*, *274*, 110992.https://doi.org/10.1016/j.jenvman. 2020. 110992.

Pérez-Moreno, J. & Read, D.J. (2021). Micorrizas y nutrición mineral de las plantas: avances y perspectivas. *Revista Mexicana de Micología*, 54, 1–20.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf.

Smith, S.E. & Read, D.J. (2018). Mycorrhizal symbiosis (4th ed.). *Academic Press*. https://doi.org/10.1016/C2016-0-04449-0.

Weil, R. R. & Brady, N.C. (2016). The nature and properties of soils, 15th edn., edited by: Fox, D. PEARSON, USA.

EVALUACIÓN DE AGROSISTEMAS MEDIANTE INDICADORES DE SUSTENTABILIDAD EN LA SIERRA NORTE DE PUEBLA

José Víctor Tamaríz Flores[1, 2, 3]; Rosalía del Carmen Castelán Vega[1, 2, 3]; Abel Cruz Montalvo[1]; Lisset Santa Cruz Ludwig[4]

[1] Centro de Investigación de Ciencias Agrícolas, [2] Posgrado en Ciencias Ambientales, [3] Maestría en Tecnologías Agrícolas Limpias, Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. San Claudio s/n, Cd. Universitaria, La Hacienda, 72592 Heroica Puebla de Zaragoza, Pue.
[4] Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo

Correo del autor de correspondencia: jose.tamariz@correo.buap.mx

RESUMEN

La agricultura en México tiene múltiples funciones en el desarrollo económico, social, ambiental, cultural e histórico que determinan que su incidencia sea mucho mayor de lo que las estadísticas señalan. En el extremo noroccidental de la Sierra Norte de Puebla, se localizan las comunidades nahuas como Atla y Xolotla, su principal actividad es la agricultura, destacando el cultivo de café, seguido por el maíz y productos como el cacahuate, frijol y garbanzo. El relieve montañoso, las altas precipitaciones, la siembra sin períodos de descanso al suelo y la falta de medidas de conservación han favorecido el deterioro de los suelos, aunado a la alta marginación de la población y desigualdad social y económica, con una desventaja para los indígenas. El trabajo realizado fue evaluar la sustentabilidad de agroecosistemas utilizando indicadores de sustentabilidad, mediante la estimación del índice de Desarrollo Sustentable. Considerando su multidimensionalidad este enfoque nos permite hacer mucho más operativa esta concepción del desarrollo, poniendo en igual orden de prioridad el desarrollo económico-social, la conservación del ambiente biofísico, que permite conducir la economía de forma tal que la producción y el consumo se fundamenten en una nueva conducta de los agentes económicos, capaz de garantizar, a las generaciones presentes y futuras, igualdad de condiciones para el despliegue de las potencialidades de todos los individuos de la comunidad, respetando las leyes objetivas que rigen la naturaleza, es decir, un enfoque en el cual estén integradas la dimensión ambiental, la económica y la social.

PALABRAS CLAVE: *Desarrollo sustentable; pueblos indígenas; sistemas agroecológicos.*

INTRODUCCIÓN

La población de Atla es predominantemente de habla náhuatl, se distingue por sus preciados textiles y bordados tradicionales, entre los cuales son muy características las gasas elaboradas en telar de cintura, empleadas principalmente en tocados. Intercambian con los yuhú de San Pablito los textiles sin decorar, para que posteriormente los complementen con bordados y diseños de su propia idiosincrasia. Entre los usos y costumbres, es relevante el ritual del volador, realizado durante la fiesta patronal; para ello, la comunidad cuenta con un grupo conformado por niños y jóvenes, siendo uno de los pocos que aún subsisten en los alrededores. El enfoque de desarrollo humano, el cual

entiende el desarrollo como un proceso de ampliación de las capacidades de "ser" y "hacer", se introduce por primera vez el Índice de Desarrollo Humano, enfoque que va más allá del crecimiento del PIB, de los ingresos, la riqueza o la acumulación de capital. En este sentido, este estudio busca apoyar a los métodos estatales de evaluación sobre cómo integrar las evaluaciones a la revisión de las bases y fundamentos del desarrollo sostenible a largo plazo en base a los ODS de la Agenda 2030 de las tres dimensiones del desarrollo sostenible: social, económica y ambiental.

MATERIALES Y MÉTODOS

El municipio de Pahuatlán se localiza al noroeste del estado de Puebla. Sus coordenadas geográficas son los paralelos 20° 13' 12 y 20° 21' 98 de latitud norte y los meridianos 98° 04' 18 y 98° 12' 12 de longitud occidental (INEGI 2000). El objetivo de la investigación realizada fue evaluar la sustentabilidad de la actividad agrícola en los agroecosistemas mediante la estimación del índice de Desarrollo Sustentable, considerando su multidimensionalidad en la localidad de Atla (Figura 1).

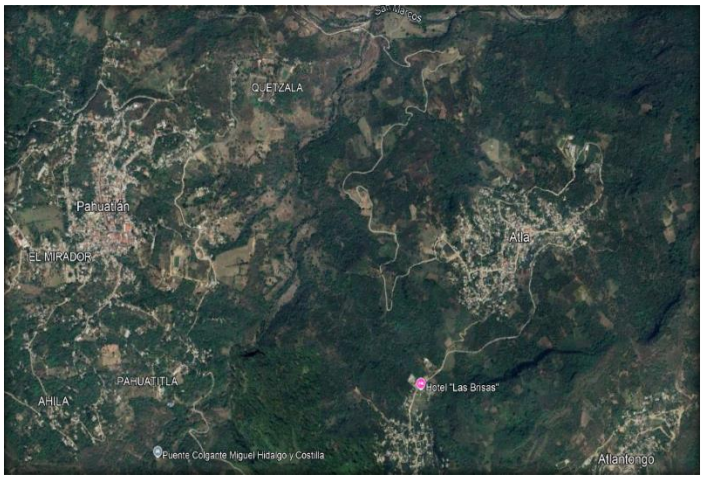


Figura 1. Localización de la comunidad en estudio.

Se realizaron reconocimientos a las localidades con el objetivo de establecer el número total de agroecosistemas, encontrando un total de 56, de este universo se seleccionaron los agroecosistemas, que representan a la comunidad. La investigación consideró un periodo de 2 años y se encuentra enmarcada como una investigación de campo de tipo descriptivo, entendida como el análisis sistemático de los problemas de los agroecosistemas, con el propósito de conocer con exactitud sus procesos sociales, costumbres y formas de manejo, para luego interpretarlos y explicar sus causas, efectos y predecir su ocurrencia. Utilizando el programa MINITAB 13 con α 0.01 y un error máximo aceptable de 0.05. La recopilación de la información sobre las formas de uso y manejo de los agroecosistemas, así como del aspecto socioeconómico de la población, se realizó mediante la aplicación estructurada de entrevistas y un cuestionario socio-técnico-económico, ambos instrumentos fueron validados mediante la opinión de tres expertos nacionales y uno internacional en las áreas de estadística, sistemas de producción y desarrollo rural, emitieron sus opiniones y sugerencias al respecto, mismas que se tomaron en consideración para la aplicación de las versiones finales.

Desde el punto de vista operacional, se definió como una expresión matemática dimensional, conformada por la suma ponderada de índices de sustentabilidad

económica, social y ambiental, de los agroecosistemas de cada una de las localidades evaluadas explicadas a través de los indicadores (Cuadro 1).

Desde el punto de vista operacional, se definió como una expresión matemática dimensional, conformada por la suma ponderada de índices de sustentabilidad económica, social y ambiental de los agroecosistemas de cada una de las localidades evaluadas, explicada a través de los indicadores mostrados en el Cuadro 1.

La Dimensión Social expresa las relaciones sociales y económicas que se establecen en cada una de las localidades estudiadas, donde el hombre actúa sobre su medio circundante para transformarlo bien de manera positiva como negativa. La Dimensión Económica representa la capacidad productiva y el potencial económico de las localidades objeto de estudio y la Dimensión Ambiental considera la biodiversidad y, en especial, los recursos como el suelo, el agua y la cobertura vegetal, que son los factores que en un plazo menor determinan la capacidad productiva de determinadas especies (Cuadro 2).

Para el caso en que los indicadores presentan una relación positiva, se adoptó la siguiente fórmula:

$$f(x) = \frac{x - m}{M - m}$$

y para el caso en que los indicadores muestran una relación negativa la siguiente:

$$f(x) = \frac{x - M}{m - M}$$

Donde: x = es el valor correspondiente del indicador en cada dimensión evaluada; m = es el valor mínimo del indicador y M = es el valor máximo del indicador, ambos durante el periodo de tiempo evaluado.

Cuadro 1. Indicadores de desarrollo sustentable por dimensión.

Dimensión	Componente	Indicador
Social	Educación y marginación	Tasa de analfabetismo (%) Tasa de permanencia de productores (%) Morbilidad (número de enfermedades) Índice de pobreza (%)
Económica	Productivo y económico	Ingreso per cápita ($ US/mes) Tasa de desempleo (%) Índice de utilización de la Tierra (%) Disponibilidad de créditos (%)
Ambiental	Agroproductivo	Agrodiversidad (número de plantas) Taza de utilización de plaguicidas (%) Tasa de utilización de fertilizantes (%) Conservación del suelo (%)

Cuadro 2. Relación de los indicadores con el desarrollo sustentable.

Indicador	Tipo de relación
Tasa de analfabetismo (%)	-
Tasa de permanencia de campesinos (%)	+
Morbilidad	-
Índice de pobreza (%)	-
Ingreso per cápita ($ US)	+
Tasa de desempleo (%)	-
Índice de utilización de la Tierra (%)	+
Disponibilidad de créditos (%)	+
Agrobiodiversidad	+
Tasa de utilización de plaguicidas (%)	-
Tasa de utilización de fertilizantes (%)	-
Conservación del suelo	+

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La producción agrícola depende de la temporada de lluvia y se desarrolla en laderas con 4 a 30% de inclinación sin medidas de conservación de suelo, el 75% de los agroecosistemas presenta erosión en diversos grados, lo que ocasiona pérdida de productividad, azolvamiento y contaminación de ríos. Las parcelas miden de media a una hectárea (minifundio) (90%), en pocos casos alcanzan cinco hectáreas (10%), con un rendimiento promedio anual menor a una tonelada por hectárea. En las tres localidades el tipo de tenencia de tierra es pequeña propiedad (80%) y renta (20%), situación que limita su desarrollo económico y social, dado que la producción en superficies pequeñas no resulta rentable, debido a que los costos de producción son altos ($ 2 500.00 ha^{-1}) y el rendimiento obtenido es bajo (800 kg ha^{-1}); de igual forma los pequeños productores y arrendatarios difícilmente son sujetos de crédito por las instituciones financieras, toda vez que no generan ingresos suficientes para pagar los intereses o, en su caso, no cuentan con propiedades para garantizar el pago del préstamo.

Al relacionar matemáticamente los indicadores de esta dimensión, se encontró que el índice de sustentabilidad social es de 0.48, lo que representa una situación del sistema inestable pero mejorable de las comunidades (Sepúlveda *et al.,* 1998). Esto a su vez sugiere que es necesario intervenir a través de la aplicación de programas de desarrollo social orientados hacia el mejoramiento de las condiciones de vida de la población que habita en esta región, puesto que sus respectivos índices de sustentabilidad social son similares. De lo contrario, es evidente pensar que su permanencia en el tiempo está seriamente comprometida por la consecuente emigración de sus habitantes y venta de sus parcelas para lograr mejores condiciones de vida.

Al comparar las tres localidades, se observó que San Pablito presenta la mayor sustentabilidad social (0.59), seguida de Xilepa (0.48) y Tlalcruz (0.38). Los resultados se muestran en la Figura 2.

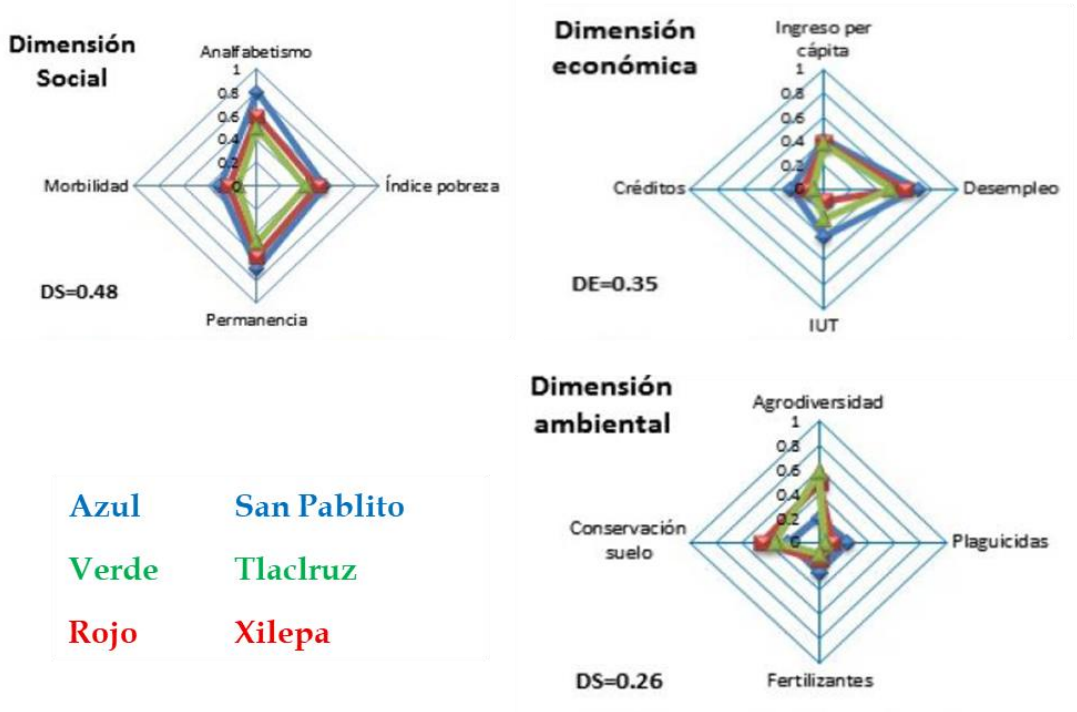


Figura 2. Relación de indicadores del desarrollo sustentable vs. dimensión.

CONCLUSIONES

El estudio del Desarrollo Sustentable permitió determinar que la dimensión ambiental es la más crítica en las localidades evaluadas (0.26), seguida de la económica (0.35) y la social (0.48); por otro lado, el índice de desarrollo sustentable por localidad mostró que Xilepa y Tlalcruz presentaron valores de 0.34 y 0.40, respectivamente, y San Pablito 0.52. En ambos casos se evidencia el estado crítico e inestable de los agroecosistemas evaluados.

BIBLIOGRAFÍA

Candelario Rosales, L. L., Ávila Bello, C. H., Flota Bañuelos, C., Fraire Cordero, S. & Rosales Martínez, V. (2025). Evaluación de indicadores de sustentabilidad del agroecosistema de caña de azúcar en Sihochac, Champotón, Campeche, México.

Márquez Zambrano, I. D. (2022). Evaluación de la sustentabilidad de agroecosistemas campesinos en el municipio de San Jerónimo Tecuanipan, Puebla. https://hdl.handle.net/20.500.11777/5219.

Montes, D. C., & Beltrán, A. G. G. (2021). Evaluación de dos agroecosistemas mediante indicadores de sustentabilidad en Sinaloa municipio, Sinaloa. *Revista Ra Ximhai*, *17*(3 Especial), 171-189. doi.org/10.35197/rx.17.03.2021.07.dc.

Sarandón, S. J., Flores, C. C., Gargoloff, N. A. & Blandi, M. L. (2014). Análisis y evaluación de agroecosistemas: construcción y aplicación de indicadores. Libros de Cátedra.

Zaragoza-Hernández, I., Romo-Lozano, J. L., Valdés-Velarde, E. & Sánchez-Hernández, R. (2025). Interpretación de la multifuncionalidad en la evaluación de agroecosistemas. *Revista Española de Estudios Agrosociales y Pesqueros,* (264), 188-214. https://doi.org/10.24197/reeap.264.2025.188-214.

INSTRUMENTACIÓN DE SITIOS DE MONITOREO PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES FÍSICAS EN SUELOS URBANOS: CASO CANTERA ORIENTE

Gabriela Raygoza Chávez[1]; Mario Cayetano Salazar[2]; Ma. del Pilar Fernández Lomelín[2]; Silke Cram Heydrich[2]; Elizabeth Chávez García[1]; Blanca Prado Pano[3]; Lucy Natividad Mora Palomino[3].

[1] Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, Universidad 3000, CDMX, México.
[2] Instituto de Geografía, UNAM, Av. Universidad No 300, CDMX, México.
[3] Instituto de Geología, UNAM, Av. Universidad No 300, CDMX, México.

Correo del autor de correspondencia: cayetano@geografia.unam.mx

RESUMEN

La rehabilitación de suelos degradados en áreas urbanas representa un componente clave para alcanzar la sostenibilidad ambiental. En Cantera Oriente (Campus-UNAM), se han implementado estrategias de manejo del suelo orientadas a mejorar sus condiciones. Este trabajo tiene como objetivo instrumentar sitios de monitoreo para dar seguimiento a variables indicadoras del cambio y mejora en la calidad del suelo como soporte de vegetación y aprovechar la instalación para la docencia. Como parte de una iniciativa de educación ambiental, se instalaron sensores en dos sitios con diferentes tipos de manejo del suelo: uno con cobertura de hojarasca y otro con pasto asilvestrado. Se colocaron bloques de yeso a diferentes profundidades para medir la humedad del suelo, registrando datos cada hora (4/noviembre a 20/diciembre de 2024). Los datos fueron analizados mediante un diseño estadístico de ANOVA para identificar diferencias significativas entre las profundidades evaluadas. En este estudio se presentan los primeros resultados, los cuales muestran que el Sitio 1 (hojarasca) conserva por más tiempo la humedad, debido al mayor contenido de materia orgánica, menor densidad aparente y mayor porosidad, lo que favorece la retención de humedad. En contraste, el Sitio 2 (pasto asilvestrado) mostró una pérdida más rápida de agua y alcanzó niveles de tensión hídrica críticos. La cobertura orgánica actuó como aislante térmico, reduciendo la evaporación y estabilizando la humedad del suelo. La instalación de estos sitios como laboratorios vivos permite vincular la investigación aplicada con la enseñanza. Este enfoque fomenta el aprendizaje interdisciplinario y posiciona al suelo urbano como un recurso educativo valioso.

PALABRAS CLAVE: *Educación ambiental; humedad; manejo de suelo; Technosol; temperatura.*

INTRODUCCIÓN

La expansión urbana ha alterado profundamente los ecosistemas naturales, afectando la estructura y el funcionamiento de los suelos. En contextos urbanos, estos suelos suelen estar deteriorados por la actividad humana, lo que limita su capacidad para desempeñar

funciones ecológicas clave como la regulación del agua, el reciclaje de nutrientes y el sustento de la biodiversidad (Uribe *et al*., 2017). Por ello, es urgente implementar estrategias efectivas de rehabilitación.

Ubicada en Ciudad Universitaria, la Cantera Oriente representa un ejemplo destacado de restauración ecológica en un entorno urbano académico. Durante más de veinte años, el sitio albergó una planta de asfalto dedicada a la extracción de roca, lo que generó un hueco de 14 hectáreas y hasta 30 metros de profundidad. Posteriormente, se utilizó como depósito de sedimentos y escombros, lo que favoreció la formación de un tecnosol capaz de albergar vegetación (Lot, 2007).

Desde 2006, diversos estudios han resaltado su valor ecológico y paisajístico, posicionándolo como un espacio ideal para la investigación científica, la educación ambiental y actividades académicas (PUCC, 2025; Aguilar y Ramírez, 2015).

Durante más de tres décadas, el mantenimiento del área incluyó riego frecuente, poda y eliminación de hojarasca. Sin embargo, en años recientes se ha observado un deterioro en la salud del arbolado, atribuible a un manejo poco adecuado. Una de las acciones clave es permitir la acumulación de hojarasca y el desarrollo libre de plantas herbáceas, con la expectativa de mejorar el contenido de materia orgánica y la capacidad del suelo para retener humedad.

El análisis de las propiedades físicas del suelo es esencial para entender el progreso de los procesos de restauración (Saavedra *et al*., 2020). La incorporación de sensores permite detectar cambios en la estructura del suelo y su funcionalidad, especialmente en aspectos como la retención de agua, la regulación del microclima y el soporte de vida biológica (Bronick y Lal, 2005; Hillel, 2004). Entre las técnicas disponibles para medir la tensión hídrica del suelo, los bloques de yeso destacan como una herramienta accesible y confiable (Hoseini y Albaji, 2016; Schwankl *et al*., 2002).

El presente trabajo se centra en la instrumentación de dos sitios de monitoreo en Cantera Oriente, con el objetivo de evaluar el efecto de prácticas sencillas, como el mantenimiento de hojarasca y el crecimiento de vegetación (sin poda) sobre variables físicas del suelo, particularmente la humedad del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en Cantera Oriente, ubicado dentro de la zona de amortiguamiento A3 de la Reserva Ecológica del Pedregal de San ángel (REPSA) (Figura 1). Se seleccionaron dos sitios con diferentes tipos de manejo de suelo: Sitio 1 Ubicado en una zona plana, en el que ya no se barre la hojarasca y además se ha enriquecido con hojas proveniente del arbolado de la ciudad universitaria; Sitio 2: Localizado en una terraza, con cobertura de pasto y otras herbáceas, donde ya no se realiza poda, permitiendo el asilvestramiento de la vegetación. En ambos sitios se realizó la descripción edafoecológica de los perfiles de suelo (Siebe *et al.,* 2016). Se determinaron propiedades como textura, pedregosidad, contenido de materia orgánica (MO), densidad aparente (DA) y porcentaje de agua disponible para las plantas (dCC).

Para el monitoreo de humedad y temperatura del suelo, se instalaron bloques de yeso a varias profundidades y sensores de temperatura a los 10 cm. Los sensores registraron datos de forma continua entre el 4 de noviembre y el 20 de diciembre de 2024. Para el análisis estadístico, se utilizaron los promedios diarios, los datos de humedad del suelo fueron evaluados mediante un análisis de varianza (ANOVA) de un factor. La validación de supuestos y la comparación de medias se realizaron mediante la prueba de Tukey.

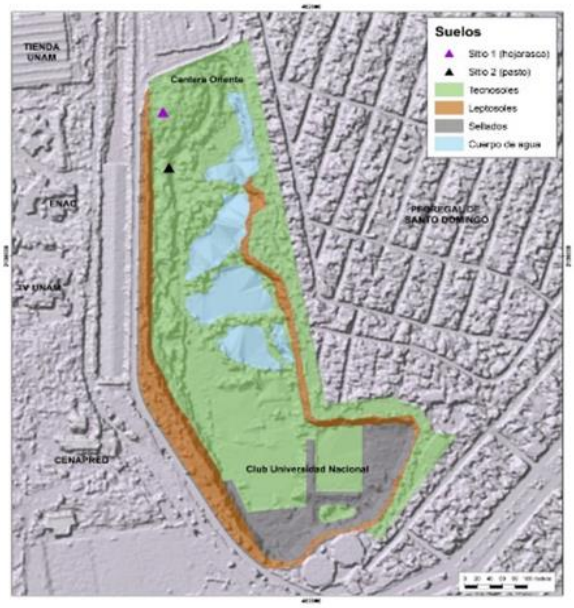


Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El perfil 1 presenta una profundidad de 55 cm, mientras que el perfil 2 alcanza los 40 cm. Ambos muestran texturas de franca a franco limosa fina, con baja pedregosidad. El contenido de materia orgánica (MO) en el perfil 1 oscila entre 2.8% y 3.7%, y en el perfil 2 entre 2.2% y 2.9%. Se observa que la densidad aparente (DA) es menor en el perfil 1 (0.9 g/cm^3) que en el perfil 2 (1.3 g/cm^3), lo que se traduce en una mayor porosidad y, por lo tanto, en una mayor capacidad para retención de agua disponible (dCC) para las plantas (perfil 1 presentó los valores de 28% y 16.5%, mientras que el perfil 2 se mantuvo en 16.5%).

El inicio del monitoreo coincidió con días lluviosos, por ello los valores de tensión (cBar) fueron cercanos a cero, lo que indica suelos saturados de agua. A través del tiempo se registró una pérdida progresiva de humedad en todas las profundidades, siendo las capas más superficiales las que se secaron más rápido en ambos perfiles (Figura 2). Asimismo, se observó un incremento de humedad con la profundidad (ANOVA, $p < 0.001$) en los dos perfiles.

En el perfil 2, la tensión a 10 cm de profundidad alcanzó 250 cBar a los 20 días del inicio del monitoreo. Las demás profundidades (20, 30 y 40 cm), también alcanzaron este valor máximo, aunque hacia el final del periodo de monitoreo. En el perfil 1 nunca se superaron los 146 cBar (registrados a los 10 cm de profundidad), y se alcanzaron valores de 87, 130, 67 y 66 cBar a 20, 30, 40 y 50 cm, respectivamente. Según Hopkins y Campbell (2021), el pasto empieza a experimentar estrés hídrico moderado a tensiones superiores a 100 cBar, lo que indica que el pasto del perfil 2 estuvo sometido a estrés en la mayor parte del periodo de medición.

Si bien, los dos sitios no son comparables directamente por sus características edáficas, cabe señalar que en general se observaron variaciones en la respuesta de la humedad del suelo: la humedad se pierde muy rápidamente en el perfil 2 (pasto), sobre todo a los 10

cm de profundidad ya que está más expuesto a la radiación solar directa que el perfil 1 (hojarasca) (Figura 2), en el cual la pérdida de humedad fue más paulatina.

En cuanto a la temperatura, el sitio cubierto con hojarasca presentó valores más bajos en comparación con el de pasto. La capa de hojarasca podría actuar como aislante térmico y barrera física, reduciendo la evaporación y moderando las variaciones de temperatura. Esta cobertura también favorece la infiltración del agua, contribuyendo así a una mayor retención de humedad. Estos resultados coinciden con lo reportado por diversos estudios, en donde se muestra como la adición de residuos vegetales mantiene temperaturas más bajas, reduce la evaporación y mantiene la humedad del suelo por más tiempo (Dahiya *et al.*, 2007; Mellouilli *et al.*, 2000; Walsh *et al.*, 1996), además de aportar materia orgánica y nutrientes al suelo (FAO, 2021; Salcedo *et al.*, 2007). Este estudio exploratorio es especialmente relevante en entornos urbanos como Cantera Oriente, donde el manejo eficiente y sostenible del agua es prioritario. La incorporación de residuos orgánicos y el crecimiento natural de la vegetación no solo representa una estrategia de rehabilitación, sino también una forma de reutilizar materiales vegetales generados en otras áreas del campus.

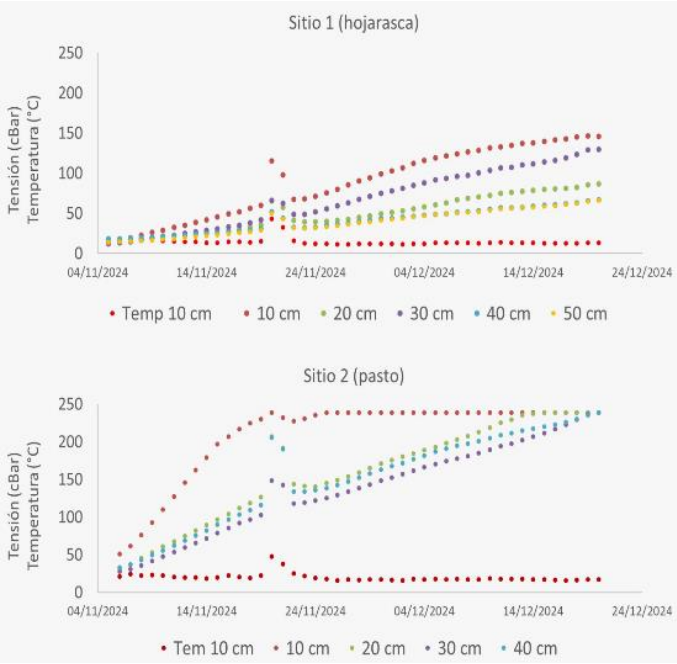


Figura 2. Temperatura y tensión del agua en los perfiles estudiados.

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que prácticas de bajo costo, como dejar la hojarasca y permitir el crecimiento de pasto pueden influir positivamente en la dinámica de la humedad del suelo. Los resultados obtenidos refuerzan la necesidad de establecer sitios permanentes de monitoreo que sirvan como base para el diseño de prácticas de manejo sustentables.

Se continuará con el monitoreo a largo plazo incorporando otras variables edáficas y biológicas que permitan evaluar de manera integral el impacto de las prácticas de rehabilitación en los Technosols.

Cantera Oriente se presenta como un espacio idóneo para la demostración y la educación ambiental, al permitir observar cómo intervenciones accesibles pueden generar mejoras tangibles en las funciones del suelo. Estas prácticas se convierten en una herramienta pedagógica que permite a los estudiantes interactuar directamente con el suelo, comprender sus dinámicas y participar activamente en procesos de rehabilitación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimiento a la DGAPA por el financiamiento a través del proyecto PAPIME PE104124 "Los suelos urbanos de la Ciudad Universitaria como un área de oportunidad para la docencia". Al Laboratorio de Impacto de Procesos Naturales y Antrópicas sobre el Territorio del Instituto de Geografía por la realización de los análisis de suelo.

Al M. en C. Isaac Quijada Mendoza por la elaboración de los mapas.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilar, M. & Ramírez, W. (2015). Monitoreo a procesos de restauración ecológica, aplicado a ecosistemas terrestres. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, Bogotá, D.C., Colombia.

Bronick, C.J. & R. Lal. (2005). Soil structure and management: a review. USA. *Geoderma*, 124(1–2): 3–22.

Dahiya, R., Ingwersen, J. & Streck,T. (2007). The effects of mulching and tillage on the water and temperature regimes of a loess soil: experimental findings and modeling. *Soil and Tillage Research*, 96: 52–63.

FAO. (2015). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Funciones del suelo. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/12f15849-3785-42e4-9405-c6565547fa3b/content.

FAO. (2021). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Uso de enmiendas orgánicas en el suelo. https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/1618077.

Hillel, D. (2004). Introduction to Environmental Soil Physics. Academic Press. San Diego, CA, USA. 494 p.

Hopkins, B. & Campbell, S. (2021). Turfgrass water stress and measurement: soil water tension as a key indicator. En: Soil Water Tension for Turfgrass Management. SportsField Management.

Hoseini, M. & Albaji, M. (2016). Calibration of gypsum blocks for measuring saline soils moisture. Communications in *Soil Science and Plant Analysis*, 47(22): 2528–2537. https://doi.org/10.1080/00103624.2016.1254793.

Lot, A. (coord.). (2007). Guía ilustrada de la Cantera Oriente. Caracterización ambiental e inventario biológico. UNAM, Coordinación de la Investigación Científica, Reserva Ecológica del Pedregal.

Mellouli, H.J., Wesemael, B., Poesen, J. & Hartmann, R. (2000). Evaporation losses from bare soils as influenced by cultivation techniques in semi-arid regions. *Agricultural Water Management*, 42: 355–369.

PUCC. (2025). Pontificia Universidad Católica de Chile.Laboratorios Vivos de Aprendizaje: campus de experimentación.

Saavedra, L., Alvarado, D., Martínez, T. & Hernández, P. (2020). Propiedades físicas y químicas del suelo urbano del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México. *Terra Latinoamericana.* https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792020000400529

Salcedo, E., Etchevers, J. & Hidalgo, C. (2007). La humedad aprovechable y su relación con la materia orgánica y superficie específica del suelo. *Terra Latinoamericana*, 25(1): 1–9.

Schwankl, L., Hopmans, J. & Hanson, B. (2002). Using Soil Moisture Blocks. University of California, Agriculture and Natural Resources, Pub. 21565. Oakland, California, USA. 8 p.

Siebe, C. Jahn, R. & Stahr K. (2016). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. (3 ed). México.

Uribe, C., Pérez, C. & Okuda, Y. (2004). Recursos hídricos y manejo del agua para un desarrollo sustentable del secano. Boletín INIA No. 123. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias*. Chillán, Chile. 187 p.

Walsh, B., Salmins, S., Buszard, D. & MacKenzie, A. (1996). Impact of soil management systems on organic dwarf apple orchards and soil aggregate stability, bulk density, temperature and water content. *Canadian Journal of Soil Science*, 76: 203–209.

EFECTO DE UN BIOFERTILIZANTE DE T*richoderma* spp. SOBRE EL CRECIMIENTO DE *RAPHANUS SATIVUS* EN DOS SUELOS

Samantha Herrera Mendoza[1]; Rocío Jetzabel Alcántara Hernández[1]; Milton Carlos Soto Barajas[3]

[1] Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad, No. 3000, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510.

Correo del autor de correspondencia: samherreram6@ciencias.unam.mx

RESUMEN

Los biofertilizantes son insumos agrícolas que contienen microorganismos benéficos, los cuales actúan sobre el suelo con el fin de mejorar la disponibilidad de nutrientes. Con su uso se pretende reducir los impactos ambientales generados por la aplicación de fertilizantes sintéticos a la vez que se promueve el crecimiento de los cultivos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la adición de un biofertilizante comercial (BFC) con cepas de *Trichoderma* spp. sobre el crecimiento de *Raphanus sativus* (rábano) en un estudio de invernadero. Se estableció un diseño experimental factorial, con dos tipos de suelo (andosol, S1, y phaeozem, S2), con BFC y sin BFC, y presencia o no de rábanos. Se tomaron muestras de suelo a los 0, 35 y 56 días del experimento y se evaluaron las características fisiológicas de la planta como altura, cantidad de hojas y peso en húmedo de hojas y bulbo. Los resultados mostraron que la adición del BFC no favoreció el crecimiento del rábano. A los 21 días, el tratamiento sin BFC en S1 (S1-B) tuvo mayor número de hojas en comparación con S1+B, y un comportamiento similar se observó en S2. A los 56 días, el peso húmedo promedio de las hojas en S2+B fue menor que en S2-B, y el peso del bulbo en S1+B tendió a ser menor que en S1-B. Estos efectos pueden atribuirse al incremento en la salinidad del suelo inducido por el BFC, afectando la absorción de minerales y el consumo de agua por las plantas. A partir de estos resultados se puede concluir que el impacto del BFC sobre el cultivo depende de las modificaciones químicas que provoca en el suelo, por lo que es necesario ajustar sus formulaciones para optimizar su eficacia.

PALABRAS CLAVE: *Agricultura sostenible; agroinsumos; crecimiento vegetal; microorganismos benéficos; salinidad del suelo.*

INTRODUCCIÓN

Los biofertilizantes son agroinsumos emergentes compuestos por inóculos de microorganismos vivos que tienen la capacidad de mejorar la disponibilidad de nutrientes y, en consecuencia, de promover el crecimiento de los cultivos (Bhattacharjee y Dey, 2014). Los microorganismos benéficos pueden ser bacterias, hongos e incluso algas. En particular, se ha reportado que el género de hongos *Trichoderma* cuenta con diferentes atributos que pueden ser aprovechados por los formuladores de bioinsumos, ya que pueden solubilizar y mineralizar nutrientes a través de la liberación de ácidos

orgánicos y enzimas como las involucradas en la mineralización de fósforo (Cortés-Hernández *et al*., 2023; Tyskiewicz *et al*., 2022; Tandon *et al*., 2020).

Así como con *Trichoderma*, el uso de microorganismos benéficos puede representar una alternativa a los fertilizantes sintéticos. Sin embargo, es fundamental comprender los efectos que puede tener su adición sobre las características del suelo y los cultivos. Por ello, en este estudio se evaluó el efecto de un biofertilizante comercial a base de *Trichoderma* spp. sobre los suelos agrícolas contrastantes y su impacto en el crecimiento de *Raphanus sativus* (rábano) en condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el invernadero de Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México durante un periodo de 56 días (agosto a octubre de 2023), donde se sembraron semillas de *Raphanus sativus* (rábano) en macetas con dos tipos de suelo para evaluar los efectos de un biofertilizante comercial (BFC) con cepas de *Trichoderma* spp. sobre el crecimiento de rábano. Se utilizaron dos tipos de suelo: 1) un suelo ándico, proveniente del estado de Morelos, México, recientemente destinado a la agricultura con manejo de temporal (S1); y 2) un suelo clasificado como Phaeozem, proveniente del Valle del Mezquital, Hidalgo, México, con un uso agrícola intensivo, en el que se aplican fertilizantes sintéticos y el riego con agua residual desde hace 100 años (S2). El diseño experimental incluyó la aplicación o no del BFC y la siembra o no del cultivo, generando ocho tratamientos con cinco repeticiones cada uno.

A lo largo del experimento se cuantificó la altura del tallo y el número de hojas de las plantas de rábano. Los rábanos se cosecharon a los 35 y 56 días después de la siembra, y se registró el peso húmedo de bulbos y de hojas. Además, se tomaron muestras de suelo para determinar pH y conductividad eléctrica (CE) por el método de pasta saturada; carbono y nitrógeno total mediante un analizador elemental CNHS/O; y fósforo disponible por el método Bray-Kurtz.

Los datos obtenidos fueron analizados por tratamiento mediante ANOVA, seguido de comparaciones post hoc de Tukey, con una significancia de $p < 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este experimento se observó un crecimiento diferencial de *Raphanus sativus* (rábano) según el tratamiento aplicado. Las plantas cultivadas en el suelo phaeozem (S2) presentaron un crecimiento mayor en comparación con aquellas sembradas en el suelo con características ándicas (S1). Además, los tratamientos sin aplicación de biofertilizante comercial (BFC) mostraron un mayor crecimiento que aquellos que sí lo recibieron (Figura 1).

Con respecto a las variables morfológicas de las plantas, se observó que la altura del tallo presentó diferencias significativas en los primeros días, especialmente en los tratamientos S1-B y S1+B, aunque estas diferencias no se mantuvieron a lo largo del tiempo. A los 21 días, el número promedio de hojas fue mayor en S1-B (3.80 ± 0.41) en comparación con S1+B (2.13 ± 0.35), comportamiento que también se observó en S2. Al finalizar el experimento (día 56), el peso fresco de hojas en S2-B fue mayor (7.55 ± 2.85 g)

que en S2+B (4.21 ± 1.63 g), mientras que el peso del bulbo en S1+B (0.53 ± 0.26 g) tuvo una tendencia a ser menor que en S1-B (3.45 ± 0.48 g) (Figura 2).

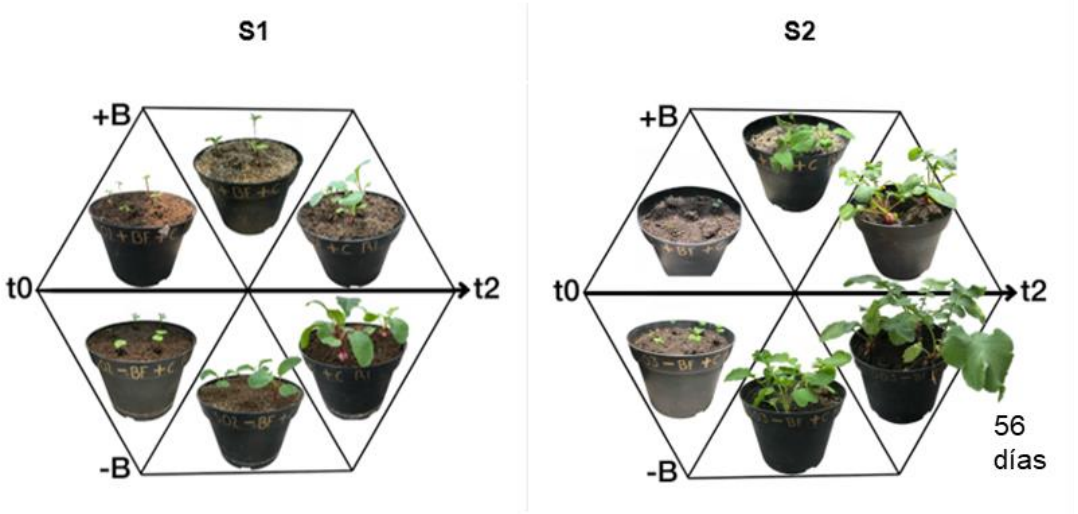


Figura 1. Crecimiento de *Raphanus sativus* por tratamiento con cultivo: tipo de suelo (S1 a la izquierda; S2 a la derecha), aplicación o no de BFC. Las imágenes fueron tomadas a los 7, 35 y 56 días después de la siembra. Tomada de Herrera-Mendoza, 2025.

El crecimiento de *Raphanus sativus* estuvo influenciado por el tipo de suelo, siendo el Phaeozem (S2) más favorable que el suelo ándico (S1), posiblemente por su mayor contenido de fósforo disponible (Cuadro 1), nutriente clave para el desarrollo vegetal (Balemi y Negisho, 2012). La deficiencia de fósforo en S1 pudo contribuir a un menor crecimiento de los rábanos, pues se ha informado que, bajo condiciones de deficiencia de fósforo, los rábanos presentan crecimiento retardado, incluso si las concentraciones llegan a ser muy bajas, pueden presentar coloraciones moradas en los peciolos y manchas pálidas en las hojas (Cetner *et al*., 2020).

Cuadro 1. Características iniciales de los suelos S1 y S2, empleados para este estudio.

Suelo	**pH**	**CE [µS cm^{-1}]**	**C_{tot} [%]**	**C_{org} [%]**	**N_{tot} [%]**	**P_{dis} [mg kg^{-1}]**
S1	6.07 ± 0.04a	183.3 ± 6.63a	5.73 ± 0.14a	5.55 ± 0.12a	0.36 ± 0.01a	1.14 ± 0.48a
S2	7.02 ± 0.02b	418.8 ± 13.4b	2.31 ± 0.04b	2.27 ± 0.03b	0.23 ± 0.01b	57.54 ± 2.56b

Por otro lado, el BFC no promovió un mayor crecimiento del cultivo. Con la adición de este bioinsumo se observó un incremento significativo en la conductividad eléctrica de ambos suelos, lo cual sugiere un efecto de salinización (Figura 2). Las pruebas químicas realizadas al BFC demostraron un alto contenido de sales (CE = 3336.33 ± 36.14 µS cm^{-1}). Se sabe que los suelos salinos pueden interferir con la absorción de agua y

nutrientes, limitando el desarrollo de especies moderadamente sensibles como el rábano (Ghosh *et al.,* 2014; Marcelis y Hooijdonk, 1999).

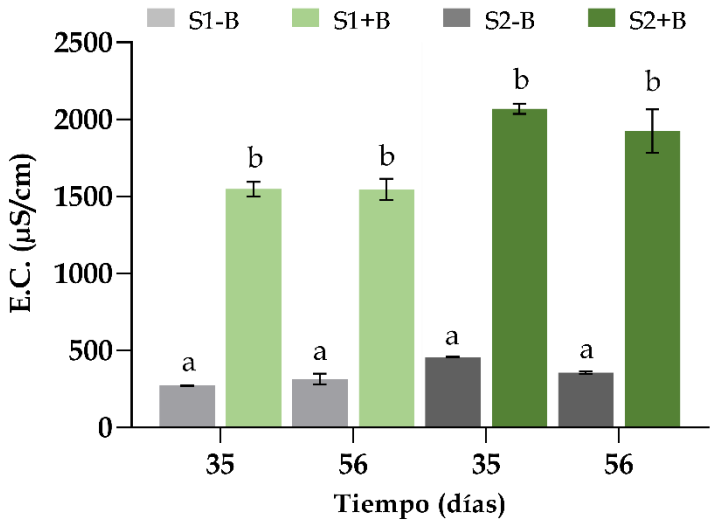


Figura 2. Conductividad eléctrica de los suelos cultivados con rábano. En gris tratamientos sin BFC; en color verde los tratamientos con BFC.

CONCLUSIONES

La adición del biofertilizante con un alto contenido de sales y bajo un sistema de riego controlado en invernadero provoca una disminución del crecimiento de las hojas, el tallo y el bulbo de rábano (*Raphanus sativus*). El tipo de suelo influye en el efecto del biofertilizante, siendo más desfavorable en suelos con baja disponibilidad de fósforo. Estos resultados destacan la importancia de considerar las propiedades edáficas y ajustar la formulación del biofertilizante para lograr una aplicación eficaz.

AGRADECIMIENTOS

A técnicos y jefes de los laboratorios: Genómica y Biotecnología, Edafología Experimental, Edafología Ambiental, Física de Suelos; así como del área de Invernadero del Departamento de Ciencias Ambientales y del Suelos, todos del Instituto de Geología de la UNAM.

BIBLIOGRAFÍA

Balemi, T. & Negisho, K. (2012). Management of soil phosphorus and plant adaptation mechanisms to phosphorus stress for sustainable crop production: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *12*(3), 547-562. https://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012005000015.

Bhattacharjee, R. & Dey, U. (2014). Biofertilizer, a way towards organic agriculture: A review. *African Journal of Microbiology Research*, *8*(24), 2332-2341. https://doi.org/10.5897/AJMR2013.6374.

Cetner, M.D., Kalaji, H.M., Borucki, W. & Kowalczyk, K. (2020). Phosphorus deficiency affects the I-step of chlorophyll a fluorescence induction curve of radish. *Photosynthetica*, *58*(3), 671-681. https://doi.org/10.32615/ps.2020.015.

Cortés-Hernández, F. del C., Alvarado-Castillo, G. & Sánchez-Viveros, G. (2023). Trichoderma spp., una alternativa para la agricultura sostenible: una revisión. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *25*(2), 73-87. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v25n2.111384.

Ghosh, P., Kumar, P., Sarker, R. & Abdul, M. (2014). Effect of salinity on germination, growth and yield of radish (Raphanus sativus L.) varieties. *International Journal of Biosciences*, *5*(1), 37-48. https://doi.org/10.12692/ijb/5.1.37-48.

Herrera-Mendoza, S. (2025). Efecto de un biofertilizante de Trichoderma spp. sobre las características fisicoquímicas y los procariontes de dos suelos agrícolas bajo cultivo de Raphanus sativus [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias]. Repositorio TESIUNAM. https://tesiunam.dgb.unam.mx

Kögel, I. & Amelung, W. (2014). Dynamics, chemistry, and preservation of organic matter in soils. En H.D. Holland & K.K. Turekian (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (2ª ed., pp. 157-215). Elsevier.

Marcelis, L.F.M. & Hooijdonk, J.V. (1999). Effect of salinity on growth, water use and nutrient use in radish (Raphanus sativus L.). *Plant and Soil*, *208*(1), 57-64.

Tandon, A., Fatima, T., Anshu, Shukla, D., Tripathi, P., Srivastava, S. & Singh, P.C. (2020). Phosphate solubilization by Trichoderma koningiopsis (NBRI-PR5) under abiotic stress conditions. *Journal of King Saud University - Science*, *32*(1), 791–798. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.02.001.

Tyśkiewicz, R., Nowak, A., Ozimek, E. & Jaroszuk, J. (2022). Trichoderma: The current status of its application in agriculture for the biocontrol of fungal phytopathogens and stimulation of plant growth. *International Journal of Molecular Sciences*, *23*(4), 2329. https://doi.org/10.3390/ijms23042329.

CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE SUELOS CAFETALEROS BAJO TRES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN HUATUSCO, VERACRUZ

Ana Leidy Copalcua Rosales[1]; Elizabeth Hernández Acosta[2]; Juan Ángel Tinoco Rueda[3]; Héctor Santos Luna Zendejas[1]; Elizabeth García Gallegos[1]

[1] Maestría en Ciencias en Sistemas del Ambiente, CIGyA-UATx. Km 10.5 Autopista San Martin-Tlaxcala, C.P. 90120. Ixtacuixtla, Tlaxcala.
[2] Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Suelos. Texcoco, Estado de México. C.P. 56230.
[3] Centro Académico Regional sede Huatusco, Carr. Federal Huatusco - Xalapa Km. 6.5. C.P. 94100. Huatusco, Veracruz.
Correo del autor de correspondencia: egarciag@uatx.mx

RESUMEN

En México, el cultivo del café se destaca como una actividad económica importante, siendo Veracruz uno de los principales productores. Se analizó el impacto de tres sistemas de producción (orgánico bajo sombra, convencional bajo sombra y a pleno sol) sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. Se ubicaron tres parcelas con las variedades Marsellesa y Costa Rica, al azar se seleccionaron cinco árboles por variedad. En total se recolectaron 120 muestras simples de suelo rizosférico, para obtener 30 muestras compuestas. Las variables determinadas fueron, densidad aparente, textura, pH, materia orgánica, nitrógeno inorgánico, fósforo, potasio y capacidad de intercambio catiónico. El diseño fue completamente al azar con un arreglo factorial 3x2, siendo los factores los sistemas de producción y las variedades. Los resultados indicaron que no existieron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre variedades, no así entre sistemas de producción ($p < 0.05$). En el sistema orgánico la densidad aparente fue menor (0.72-0.73 g cm^{-3}) y se tuvo un mayor contenido de materia orgánica (7.99 a 9.06%). En el sistema convencional a pleno sol y con sombra se presentó un incremento del N inorgánico y fósforo, así como de potasio y la capacidad de intercambio catiónico. Se concluye que el tipo de manejo impacta significativamente a las propiedades edáficas, en particular a la materia orgánica y densidad aparente, indicadores importantes de la calidad del suelo para la producción del cultivo de café.

PALABRAS CLAVE: *Café; sistema agroforestal*; *propiedades del suelo*.

INTRODUCCIÓN

En México, los principales estados productores de café son Chiapas con 392,903 t, Veracruz 256,256 t y Puebla 228,006 t, los cuales aportan el 37.2%, 24.3% y 21.6%, respectivamente (SIAP, 2024). Dentro del estado de Veracruz, la región de Huatusco se localiza en las inmediaciones de la cordillera de la Sierra Madre Oriental, interrumpida por los volcanes Pico de Orizaba y el Cofre de Perote, por lo que es considerada una de las regiones privilegiadas para la producción de café, principalmente por sus condiciones edafoclimáticas y pendiente (5-30%) (SAGARPA, 2011).

La producción del cultivo de café es una actividad económica importante, la cual se realiza bajo sombra y a pleno sol, por lo que es esencial evaluar las propiedades físicas y químicas de los suelos, para identificar en qué condiciones de degradación o conservación se encuentran (Sánchez-Hernández *et al*., 2018). El manejo del cafetal involucra principalmente controlar la radicación solar, la nutrición de las plantas y regular la acidez del suelo, esto es de suma importancia para mantener una producción estable y de calidad a lo largo del tiempo (Farfán-Valencia, 2020). El suelo, como recurso natural, es fundamental para la producción de café, el contenido de materia orgánica, nutrimentos, condiciones físicas y biológicas afectan directamente a la productividad del cultivo (Chávez-Caiza *et al*., 2021). Debido a lo anterior, el objetivo de esta investigación consistió en determinar el impacto que ocasiona un manejo orgánico bajo sombra, convencional bajo sombra y a pleno sol con las variedades Marsellesa y Costa Rica, sobre las propiedades físicas y químicas del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El municipio de Huatusco pertenece a la región de "Las Montañas" y se ubica en la zona centro del estado de Veracruz, entre las coordenadas 19° 04' y 19° 13' N y los meridianos 96° 41' y 97° 04' O. El relieve es montañoso de norte a sur y pertenece al eje Neovolcánico. El clima es semicálido subhúmedo y templado húmedo, los cuales cubren el 57 y 20%, respectivamente. La precipitación promedio anual oscila entre 1 700 y 2 000 mm y el suelo dominante es del orden Andosol (44.2%), seguido de Luvisol (42.8%) y Leptosol (9.8%) (INEGI, 2010). Se seleccionaron tres parcelas cultivadas con las variedades Marsellesa y Costa Rica, una con manejo orgánico bajo sombra del Centro Académico Regional (CAR) sede Huatusco de la Universidad Autónoma Chapingo y dos parcelas bajo manejo convencional bajo sombra y a pleno sol en la localidad de Tlavictepan (Cuadro 1).

Cuadro 1. Manejo de los sistemas de producción de suelos cafetaleros en Huatusco Veracruz.

Sistema	Tiempo (años)	Coordenadas geográficas	Manejo	Altura (m s.n.m.)
Orgánico bajo sombra (OBS)	45	19º 17'47" LN 96º 96'45" LO	Sombra de *Inga* sp y *Grevillea robusta* Control manual de malezas Control de la broca. Atrayentes Aplicación de estiércol y composta	2 135
Convencional pleno sol (CPS)	10	19º 14'75" LN 96º 92'89" LO	Fertilización química Aplicación de herbicidas Control de la broca. Atrayentes	1 917
Convencional bajo sombra (CBS)	10	19º 14'80" LN 96º 92'92" LO	Sombra de *Inga* sp y *Grevillea robusta* Fertilización química Aplicación de herbicidas Control de la broca. Atrayentes	1 915

Se eligieron cinco plantas al azar por variedad dentro de cada parcela, se identificó la zona de goteo y se establecieron cuatro puntos en la periferia, se retiró la hojarasca y recolectaron las muestras de suelo rizosférico a una profundidad de 0-20 cm. En total 120 muestras simples para obtener 30 muestras compuestas (Gelvez-Pardo *et al*., 2020), las cuales se colocaron sobre papel kraft para secarse a temperatura ambiente y a la sombra, seguidas del tamizado en una malla de 2 mm para homogeneizar el tamaño de partícula. A cada muestra se le determinó textura, densidad aparente, pH, materia orgánica, nitrógeno inorgánico, fósforo disponible, capacidad de intercambio catiónico y potasio, todo de acuerdo con los métodos que establece la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002).

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar en arreglo factorial 3 x 2, donde el factor A correspondió al sistema de producción (sistema orgánico bajo sombra, convencional bajo sombra y a pleno sol) y el factor B a la variedad (Marsellesa y Costa Rica), con 6 tratamientos y 5 repeticiones, siendo la unidad experimental el suelo rizosférico de cada parcela. El modelo estadístico utilizado, $Y_{ijk}=\mu+A_i+B_j+(AB)_{ijk}+\varepsilon_{ijk}$; donde, Y_{ijk}=variable respuesta, μ=efecto de la media, A_i=efecto de la media por el nivel i del factor A, B_j=efecto de la media por el nivel j del factor B, (AB)ijk=efecto de la media causado por la interacción del nivel i del factor A y del nivel j del factor B, ε_{ijk}=error experimental asociado al efecto de cada factor. El análisis estadístico consistió en someter los datos a una prueba de normalidad (Shapiro-Wilk, $p > 0.05$), seguido de un análisis de varianza y una prueba de medias Tukey ($p < 0.05$) para determinar diferencias entre los tratamientos. Todo lo anterior con el programa estadístico InfoStat versión libre 2020.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados mostraron que en los suelos cultivados con las variedades Marsellesa y Costa Rica en los tres tipos de manejo predominó la fracción arena en un intervalo de 61.45 a 78.45%, seguido de las partículas de limo y arcilla. La densidad aparente en todos los suelos fue < 1 $g \cdot cm^3$, valor dentro de lo que establece la NOM-021-SEMARNAT-2000 para suelos de origen volcánico (Semarnat, 2002), siendo diferente ($p < 0.05$) en el suelo con la var. Costa Rica en el sistema convencional bajo sombra, respecto a la var. Marsellesa y Costa Rica en el sistema de manejo orgánico bajo sombra (Cuadro 2), donde existe una mayor porosidad y, por lo tanto, habrá un mejor desarrollo de las raíces y actividad microbiana (Rodríguez-Delgado *et al.,* 2025).

El contenido de materia orgánica fue diferente entre tratamientos ($p < 0.05$), donde el suelo de la var. Marsellesa en el manejo orgánico bajo sombra presentó el mayor porcentaje (9.06%), seguido de la var. Costa Rica (7.99%), clasificados como medios (6.1 – 10.9%) para suelos volcánicos, según la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002). López Báez *et al*. (2016) encontraron en suelos cafetaleros de Guerrero un promedio de 8.51% superior a los suelos bajo estudio, excepto en el orgánico bajo sombra con la var. Marsellesa. Esta propiedad es un componente importante del suelo, ya que se relaciona directamente con otras propiedades edáficas, facilita el reciclaje de nutrientes y el funcionamiento de procesos ecosistémicos (Urriola-Leanne, 2020).

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas de los suelos cafetaleros, Huatusco, Veracruz.

Sistema	Variedad	Densidad aparente (g cm^{-3})	Materia orgánica (%)	N inorg. (%)	pH	Fósforo (mg kg^{-1})	Potasio (mg kg^{-1})	CIC [$Cmol^{(+)}kg^{-1}$]
OBS	Marsellesa	0.72 b	9.06 a	43.37 b	4.55 b	5.42 c	416.00 b	7.36 bc
	Costa Rica	0.73 b	7.99 ab	53.80 b	4.51 bc	6.08 c	355.33 b	6.31 bc
CPS	Marsellesa	0.88 ab	3.21 c	104.93 b	3.85 c	36.10 ab	358.67 b	5.29 c
	Costa Rica	0.87 ab	3.38 c	309.20 a	4.27 bc	19.91 bc	588.67 ab	8.26 b
CBS	Marsellesa	0.86 ab	5.77 abc	240.20 a	3.98 bc	18.82 bc	702.00 a	5.33 c
	Costa Rica	0.97 a	5.31 bc	49.40 b	6.09 a	53.43 a	343.33 b	15.95 a

Letras distintas por columna indican diferencias significativas, Tukey ($p<0.05$). OBS. Orgánico bajo sombra, CPS. Convencional pleno sol, CBS. Convencional bajo sombra.

En relación a los valores ácidos obtenidos del pH en los tres sistemas de producción, una característica común en suelos cafetaleros, en el estudio de Cardona y Sadeghian (2005) reportaron que suelos con exposición solar presentaron un promedio de 5.08 y en los suelos bajo sombra (5.1), valores por encima de lo obtenido en los suelos del presente estudio, excepto en el suelo con manejo convencional bajo sombra. En este mismo manejo, la concentración de fósforo con la var. Costa Rica se tuvo el mayor contenido (> 30 mg kg^{-1}), posiblemente por efecto de la fertilización, no así en el suelo bajo sombra, con las dos variedades las concentraciones fueron bajas (< 15 mg kg^{-1}); lo que coincide con el 4.17 mg kg^{-1} en el sistema bajo sombra que reportan los autores antes mencionados. La disponibilidad de fósforo es muy susceptible al pH del suelo; en suelos ácidos, tiende a fijarse y ser menos disponible, por lo tanto, los manejos que optimizan el pH y la materia orgánica pueden mejorar su disponibilidad (López Báez *et al*., 2016). El potasio fue significativamente mayor ($p < 0.05$) en el suelo con la var. Marsellesa en el manejo convencional bajo sombra, de acuerdo con Landon (1984), los valores son altos (>235 mg kg^{-1}). Lo que coincide con Contreras Cruz *et al*. (2019), quienes reportaron que el contenido de potasio fue mayor en cafetales bajo sombra.

La capacidad de intercambio catiónico es de vital importancia para la disponibilidad de nutrimentos, los resultados mostraron que el suelo de la var. Costa Rica con el manejo convencional bajo sombra es clasificado como medio en comparación con la var. Marsellesa con el manejo convencional a pleno sol, donde fue baja, valores menores al promedio reportado por López Báez *et al*. (2016) de 16.4 $Cmol^{(+)}$ kg^{-1}. El sistema de producción en suelos cafetaleros incide directamente en las características edáficas y funciones del suelo. Se ha evidenciado que, aunque los monocultivos y cultivos expuestos a pleno sol pueden favorecer una mayor productividad, tienden a causar deterioro en la calidad edáfica, reflejado en la compactación del suelo, disminución de materia orgánica y nutrimentos. En comparación con los sistemas bajo sombra que incorporan árboles que contribuyen significativamente al mantenimiento y mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo, brindando beneficios como la mitigación de la erosión, el enriquecimiento orgánico mediante la incorporación de la hojarasca y una mayor eficiencia en la retención de agua y nutrimentos (Pereyra-Chacón *et al.,* 2025). Un manejo intensivo y continuo que no incorpora prácticas de conservación y mejoramiento del

suelo provoca un aumento de la densidad aparente, disminución del contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y el pH, lo que afecta la aptitud para una producción sostenida (Ruiz-García *et al*., 2020; Farfán-Valencia, 2020).

CONCLUSIONES

El manejo en cada uno de los sistemas de producción de café influye en cada una de las propiedades físicas y químicas del suelo. El sistema de producción convencional puede estar asociado a una degradación del suelo, dada por un incremento en la densidad aparente y a una disminución de la materia orgánica; mientras que, el sistema de producción bajo sombra con manejo orgánico contribuye a mantener y mejorar las condiciones del suelo, regulación de temperatura y promoción de la biodiversidad para la producción de café de las variedades Marsellesa y Costa Rica.

BIBLIOGRAFÍA

Cardona, C. D. A. & Sadeghian K.H. (2005). Evaluación de propiedades físicas y químicas de suelos establecidos con café bajo sombra y a plena exposición solar. *Cenicafé* 56 (4), 348-364.

Chávez-Caiza, J. P., & Burbano-Rodríguez, R. T. (2021). Cambio climático y sistemas de producción agroecológico, orgánico y convencional en los cantones Cayambe y Pedro Moncayo. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales* 29, 149-166. https://doi.org/10.17141/letrasverdes.29.2021.4751

Contreras-Cruz, A., Sánchez-Morales, P., Romero-Arenas, O., Rivera-Tapia, J.A., Ocampo-Fletes, I. & Parraguirre Lezama, J. F. C. (2019). Prácticas agroecológicas y su influencia en la fertilidad del suelo en la región cafetalera de Xolotla, Puebla. *Acta Universitaria* 29, 1-16. https://doi.org/10.15174/au.2019.1864

Farfán-Valencia, F. (2020). Sistemas de producción: Conceptos y definiciones. En: Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.). *Manejo Agronómico de los Sistemas de Producción de Café*. Cenicafé. pp. 14-33.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010 Huatusco. Veracruz de Ignacio de la Llave. 10 p.

Landon, J. R. (1984). Booker tropical soil manual. Booker Agriculture International Limited, Londres, Inglaterra.

López-Báez, W., Castro-Mendoza, I., Salinas-Cruz, E., Reynoso-Santos, R. & López-Martínez, J. (2016). Propiedades de los suelos cafetaleros en la Reserva de la Biósfera El Triunfo, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(3), 607-618.

Gelvez-Pardo, I.M., Moreno-Rodríguez, J.M. & Santos-Díaz, A.M. (2020). *Guía de muestreo de suelo para análisis microbiológico*. *Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia*), pp.25-45

Rodríguez-Delgado, I., Martín-Martín, G. J., Pérez-Iglesias, H. I., & García-Batista, R. M. (2025). Comportamiento de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en sistemas de producción agrícola. *Revista Digital Universitaria* 22(3), pp. 184-196.

Ruiz-García, P., Gómez-Díaz, J. D., Valdes-Velarde, E., & Monterroso-Rivas, A. I. (2020). Sistemas agroforestales de café como alternativa de producción sustentable para pequeños productores de México. *Ra Ximhai* 16(4), 137-158.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2015). *Mapa de proyectos / circuitos locales de café: Investigación aplicada para la integración de circuitos locales de producción y comercialización de café* (Folio 211PP073). SAGARPA, Componente de Planeación de Proyectos, México, pp.49-55.

Sánchez-Hernández, S., Escamilla-Prado, E., Mendoza-Briseño, M. A., & Nazario-Lezama, N. (2018). Calidad del café (*Coffea arabica* L.) en dos sistemas agroforestales en el centro de Veracruz, México. Agro Productividad, 11(4), 80-86.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2002). Norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). Escenario mensual de productos agroalimentarios. Café cereza. 15 de agosto de 2024.

Pereyra-Chacón, A. G., Rodríguez-Larramendi, L. A., Campos-Saldaña, R. A., & Cruz-Macías, W. O. (2025). Indicadores de sustentabilidad en un sistema agroforestal de producción de café: Un estudio de caso en el Rancho Morelia. *Revista Científica y Académica*, 5(1): 113–127. https://doi.org/10.61384/r.c.a..v5i1.830.

Urriola-Leanne, S., L.A. (2020). ¿Por qué estudiar las propiedades físicas del suelo? *Revista Semilla del Este* 1(1):23-26.

CARACTERIZACIÓN DEL SUELO DE UN BOSQUE COMESTIBLE EN OCOZOCOAUTLA DE ESPINOSA, CHIAPAS, MÉXICO

Carolina Morales Salcedo[1]; Gilberto Vela Correa[1]; Virginia Cervantes Gutiérrez[1]; Jordan Kyril Golubov Figueroa[1]

[1] Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. Calzada del Hueso 1100, Colonia Villa Quietud, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04960, Ciudad de México, México.

Correo del autor de correspondencia: cmoralessalcedo@hotmail.com

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo identificar y analizar indicadores de salud de suelo en un bosque comestible de 3 ha ubicado en la Depresión Central de Chiapas, México, con la finalidad de comprender su fertilidad y distribución de MO en el predio. Se trazó una cuadrícula en el predio para obtención de 18 muestras de suelo tomando en cuenta la NOM-021-SEMARNAT-2000, así como 2 muestras como testigos de la Selva Baja Caducifolia circundante. Los análisis de las diferentes muestras de suelo arrojaron que la textura franco-areno-arcillosa es común en todos los sitios, pero las diferencias de porosidad y de humedad son evidencias de intervención humana. A pesar de que tuvieron un pH neutro a ligeramente alcalino (7.67–7.86), una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) hasta 53.08 cmol(⁺)kg, y una alta saturación de bases, donde evidenciaron altos contenidos de Ca^{2+} (hasta 56.66 meq 100 g); también se observaron déficits severos en nutrientes esenciales. El potasio intercambiable (K^{+}) fue bajo en todos los sitios (máx. 0.46 meq 100 g) especialmente bajo en el sitio 2 (0.15 meq 100 g), en tanto que el Mg^{2+} también fue deficiente en el sitio 2 (3.56 meq 100 g). El sitio 4 destaca por tener un alto contenido de materia orgánica (10.52%) el cual no se tradujo en proporciones en mayores contenidos de K^{+} o de CIC, advirtiéndose una posible mineralización lenta o una retención de nutrientes. Los testigos de selva baja caducifolia muestran el equilibrio edáfico natural, donde tiene cierta importancia la aportación orgánica continua y ciclo de nutrientes, siendo referente a imitar para las condiciones edáficas del Bosque comestible.

PALABRAS CLAVE: *Agroforestería, bases intercambiables, enmiendas orgánicas, indicadores de suelo, materia orgánica*.

INTRODUCCIÓN

Los bosques comestibles son sistemas agroforestales que son diseñados para imitar la estructura multiestrato y la funcionalidad de un bosque natural, pero con especies comestibles y multiuso principalmente perennes (Jacke y Toensmeier, 2005). Los indicadores de salud del suelo y su monitoreo en un bosque comestible pueden ser novedosos y fundamentales para garantizar la sostenibilidad y la productividad a largo plazo de este tipo de agroecosistemas (Hart, 1996). Comprender aspectos como la estructura del suelo, el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la materia orgánica y los nutrientes disponibles es fundamental para adecuar las prácticas de

manejo que mejoren la fertilidad del suelo, y aseguren la disponibilidad de alimentos a largo plazo para quienes gestionan un bosque comestible (Brady y Weil, 2008). La materia orgánica (MO) es uno de los parámetros más importantes de la salud del suelo ya que incide directamente en el suelo, por ejemplo, en la fertilidad, la capacidad de retención de agua y nutrientes, en la CIC, la actividad biológica y estabilidad de los agregados (Lavelle y Spain, 2001), por lo que el objetivo de este estudio fue identificar y analizar indicadores de salud de suelo en un bosque comestible de 3 ha ubicado en la Depresión Central de Chiapas, México, con la finalidad de comprender su fertilidad y distribución de MO en el predio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio es un bosque comestible denominado "El Chipilinar" con 3 hectáreas de extensión. Se ubica en la comunidad de La Independencia en el municipio de Ocozocoautla de Espinosa, Chiapas, México (Figura 1). Se encuentra sobre la subprovincia de la Depresión Central de Chiapas (INEGI, 2010). La región se caracteriza por tener rocas sedimentarias que pertenecen a la formación Sierra Madre del Cretácico inferior y está compuesta principalmente de calizas y dolomitas (INEGI, 2010). Dominan los Leptosols y Vertisols cálcicos (INEGI, 2010).

Se trazaron 18 cuadrantes con una superficie de 1,428 m^2 cada uno. En la parte central de cada uno, se recolectaron muestras de suelo de 0 a 30 cm de profundidad. Además, de una zona circundante de selva Baja caducifolia (SBC), se seleccionaron 2 cuadrantes como controles, dando un total de 20 sitios de muestreo.

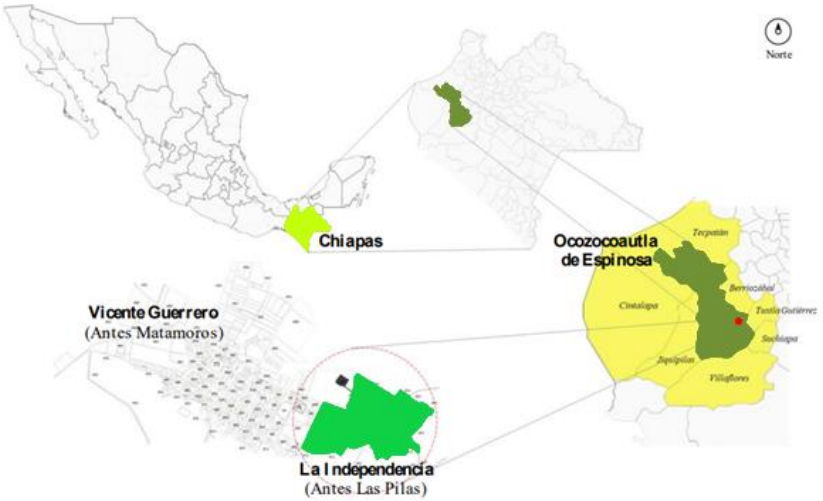


Figura 1. Ubicación de la zona es estudio.

Las propiedades físicas que se determinaron fueron las siguientes: Profundidad, Textura (Bouyoucos, AS-09). Las químicas fueron: pH (Método AS-02 Nessler); CIC (SEMARNAT, 2012), MO y COS. (Walkey y Black, 1934), Ca^{2+}, Mg^{2+}, NA^{+} y K^{+} intercambiables (Método AS-12). Se siguieron los procedimientos de la NOM-021-SEMARNAT-2000 en el laboratorio de Edafología y Absorción Atómica de la UAM-Xochimilco.

Finalmente, con los datos obtenidos se elaboraron mapas en Arcgis Pro para conocer su distribución en el predio. Se tomó como referencia la clasificación de MO sugerida por Walkley y Black para seleccionar las 4 áreas dentro del predio, lo cual permite fijar la atención hacia las zonas que requieren más trabajo agroecológico dentro del bosque comestible.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se seleccionó el mapa de MO que presentó una agrupación de puntos más clara, formando una distribución de 4 áreas en el predio y en función del promedio del porcentaje. Las áreas fueron: bajo=rojo; medio=naranja; alto=amarillo y muy alto=verde. El promedio de los valores obtenidos en las áreas de control (SBC) se muestra en color gris (Cuadro 1, Figura 2).

Cuadro 1. Valores promedio de las propiedades físicas y químicas de los suelos en un bosque comestible**.**

Propiedad	Área 1 (rojo) Bajo (0.6 – 1.5%)	Área 2 (Naranja) Medio (1.6 – 3.5%)	Área 3 (amarillo) Alto (3.6– 6.0%)	Área 4 (Verde) Muy Alto (> 6.0%)	Testigos (SBCs)
MO (%)	0.68	2.14	4.06	10.52	4.65
COS (%)	0.39	1.24	2.36	6.10	2.69
CIC $cmol^{+}$ kg)	53.08	27.94	45.56	49.73	45.82
pH	7.81	7.85	7.67	7.85	7.86
Ca^{2+} (meq 100 g)	47.84	48.73	45.56	50.06	51.62
Mg^{2+} (meq/100 g)	8.34	3.56	4.17	7.01	6.45
Na+ (meq 100 g)	0.77	0.25	0.51	0.65	0
K^{+} (meq 100 g)	0.46	0.15	0.38	0.32	0.23
Porosidad (%)	46.54	39.01	45.19	42.24	44.61
Humedad H (%)	18.18	8.18	12.92	14.52	17.01

MO=Materia Orgánica; COS=Carbono Orgánico en el Suelo; CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico; pH= potencial de Hidrogeno; Cationes intercambiables: Ca^{2+}=calcio, Mg^{2+}=magnesio, Na^{+}=sodio, K^{+}=potasio.

Área 1 (Bajo, 0.68% MO): A pesar de su baja materia orgánica —indicadora de limitada actividad biológica y pobre estructura— esta zona presenta una CIC alta y elevados niveles de Ca^{2+} y Mg^{2+} moderados, atribuibles a la naturaleza cálcica de los Vertisoles de la región; el K^{+} bajo indica, un riesgo de deficiencia para los cultivos. La porosidad y humedad también son altas, lo que sugiere que la textura arcillosa (26.6%) compensa parcialmente la falta de MO.

Área 2 (Medio, 2.14% MO): Esta es la zona más crítica del sistema: aunque su MO es moderada (suficiente para la mayoría de los cultivos e insuficiente para cultivos intensivos según la FAO, 2008), presenta la CIC más baja del predio: A pesar de buen contenido de Ca^{2+}, los bajos niveles de Mg^{2+} y K^{+} sugieren desequilibrios nutrimentales. Tanto la porosidad como la humedad son muy bajas, lo que indica compactación y un

riesgo de estrés hídrico debido a la poca infiltración, lo que empeora debido a la falta de cubierta observada en el sitio.



Figura 2. Distribución de la materia orgánica en el predio.

Área 3 (Alto, 4.06% MO): Representa el equilibrio ideal del bosque comestible con una MO óptima para prácticas de una agricultura sostenible (FAO.2008). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) está alineada con la MO y la textura. El pH ligeramente alcalino contribuye a la disponibilidad de los micronutrientes (Lavelle y Spain, 2001). El K^+, el Na^+, el Ca^{2+} y el Mg^{2+} sugieren un equilibrio catiónico aceptable. La porosidad alta y la humedad adecuada contribuyen a que sea un suelo fértil y su estructura sea migajosa y estable, con buena capacidad de almacenamiento de agua y nutrientes. El K^+ es bajo, aunque se sitúa con los valores límite, por lo que puede ser requerido un aumento para cosechas con más demanda. Esta área se puede usar como modelo a replicar en otras áreas, ya que demuestra que el sistema puede sostener fertilidad química y biológica sin depender exclusivamente de la mineralogía del suelo.

Área 4 (Muy Alto, 10.52% MO): Con la mayor acumulación de materia orgánica del predio —característica de sistemas forestales maduros o con alto aporte de biomasa— muestra una CIC alta influenciada por la MO y la arcilla. El pH es ligeramente alcalino, aunque no sería limitante para la mayoría de los cultivos. Los niveles de Ca^{2+}, de Mg^{2+} son buenos, sin embargo, el bajo contenido de K^+ sugiere un reciclaje incompleto de nutrientes. La porosidad y la humedad del suelo son buenas, indicando que el suelo tiene buena capacidad de retención de nutrientes y del agua. La M.O. estaría actuando como reserva para el N^{3-}, P^{3-}, S^{2-} y otros cationes. Sin embargo, la alta cantidad de Mg^{2+} puede competir con Ca^{2+} si esta relación entre ambos no se controla, y existe riesgo de pérdida de nitratos (NO_3^-) si no se controla la cobertura vegetal activa.

Controles (Selva Baja Caducifolia secundaria, 4.65% MO): corresponden a la selva baja caducifolia secundaria circundante al predio mostrando una materia orgánica (MO) alta y con una buena capacidad de intercambio catiónico (CIC). El pH es alto, típico de este

ecosistema. En la composición de cationes Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} y Na^{+} se muestra parecido al área 3 del predio. La porosidad y humedad también son altas. El ecosistema estudiado es natural, con un buen ciclado de nutrientes, en el que la MO es mantenida gracias a la constante aportación de hojarasca y al bajo nivel de perturbación. Aunque la concentración de K^{+} se muestra baja, lo que revela un patrón regional más que un problema de manejo, probablemente asociado a la lixiviación en suelos alcalinos o baja mineralización, destacando la necesidad de estrategias biológicas —no solo químicas— para cerrar ciclos de nutrientes en todo el predio.

CONCLUSIONES

La caracterización del suelo en el bosque comestible "El Chipilinar" reveló que la MO fue el parámetro significativo para diferenciar las cuatro áreas identificadas, lo que permite dirigir el manejo agroecológico de manera específica. A pesar de la baja MO en el Área 1, esta presenta la CIC más alta y buenos niveles de Ca^{2+}, atribuibles a los Vertisols cálcicos de la región; sin embargo, requiere mejoras en su componente biológico. El Área 2 es la más crítica, con la menor CIC, porosidad y humedad, además de bajos Mg^{2+} y K^{+}, lo que la convierte en prioridad de intervención. Las Áreas 3 y 4 muestran más alto porcentaje de MO, equilibrio en CIC, cationes y propiedades físicas, siendo parecidas a los testigos de selva baja caducifolia, lo que indica que el sistema agroforestal puede emular la fertilidad del ecosistema natural. La baja concentración de K^{+} en todas las áreas —incluyendo los testigos— sugiere un patrón regional, más que un déficit del manejo. Para este estudio, la cartografía de MO demostró ser una herramienta útil para identificar la zona modelo (Área 3) y zonas críticas (Áreas 1 y 2). Además, se demostró que el bosque comestible presenta un alto potencial de sostenibilidad, pero su productividad a largo plazo depende de ajustar prácticas según la variabilidad espacial de la MO y los parámetros asociados, priorizando la restauración de zonas degradadas y continuar con el mantenimiento de las más fértiles.

BIBLIOGRAFÍA

Brady, N.C. & Weil. R.R., (2008). The Nature and Properties of Soils (15th ed.). Prentice Hall.

Hart, J. (1996). Forest Gardening: Rediscovering Nature and Community in a Post-industrial Age. Edit. Green Books. 224p.

INEGI (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010 Ocozocoautla de Espinosa Chiapas. México. 10p.

Jacke, D. & Toensmeier, E. (2005). Edible Forest Gardens: Ecological Desing and Practice, Volume 2 Chelsea Green Publishing. 668p.

Jacke, D. & Toensmeier, E., (2005). Edible Forest Gardens: Vision and Theory, Volume 1 Chelsea Green Publishing. 396 p.

Lavelle, P. & Spain, A.V., (2001). Chapter IV functioning of the soil system: Soil Ecology. Kluwer Academic Publishers. 301 p.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. México.

EVALUACIÓN DEL CAMBIO DE USO DE SUELO ENTRE 2001 Y 2021: DISTRITO DE DESARROLLO RURAL COATEPEC, VERACRUZ, MÉXICO

Karla Adylene Mora Padilla[1]; Ofelia Andrea Valdés Rodríguez[1]; Fernando Salas Martínez[2]

[1] Maestría en Desarrollo Regional Sustentable en El Colegio de Veracruz, Carrillo Puerto #26, Zona Centro, Centro, C.P. 91000, Xalapa-Enríquez, Veracruz, México
[2] Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carr. Pachuca-Tulancingo km. 4.5, Mineral de la Reforma, C.P. 42184, Hidalgo, México

Correo del autor de correspondencia: mpadillaka.mdrs24@colver.edu.mx

RESUMEN

El uso de suelo hace referencia a la forma en la que el ser humano emplea dichas coberturas para satisfacer sus necesidades, además, describe las actividades humanas llevadas a cabo en la superficie terrestre para la obtención de bienes y servicios como la agricultura, asentamientos urbanos, pastizales, zonas forestales, entre otros. El objetivo de la investigación fue analizar con ayuda de los Sistemas de Información Geográfica los cambios de uso de suelo en el Distrito de Desarrollo Rural de Coatepec (DDRC), Veracruz, México, comparando los años 2001 y 2021. Para este análisis se utilizó la información de las cartas de uso de suelo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) de las series II y VII y se realizaron análisis estadísticos. Posteriormente, se obtuvieron mapas de uso de suelo, extensión de coberturas, tasas de cambio y matrices de transición después de una previa reclasificación de coberturas. Los resultados destacaron el aumento de la agricultura (128.81%), los pastizales (30.77%) y la expansión de la mancha urbana (13.58%), aprovechando principalmente las áreas desprovistas de vegetación y las zonas boscosas. Asimismo, se observaron las transiciones entre coberturas, siendo la agricultura de temporal y los pastizales las de mayor extensión hacia las demás coberturas. Se concluye que en los últimos 20 años existió una dinámica marcada por los cambios de uso de suelo, especialmente por y para las actividades humanas. La evaluación de los cambios de uso de suelo permite identificar la dinámica territorial, prever riesgos ligados a la pérdida de ciertas coberturas y ser una herramienta en la implementación del desarrollo sostenible.

PALABRAS CLAVE: *Cobertura vegetal; DDRC; SIG; Tasa de cambios; Transiciones.*

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el uso indiscriminado del suelo, a través de actividades como la minería ilegal y la deforestación, ha traído consecuencias serias, como la alteración del paisaje, de los ciclos hidrológicos y de las propiedades del suelo, trayendo consigo la erosión de este, siendo la principal causa su explotación para el laboreo (Pineda-Pastrana, 2011).

En el caso de México, en los últimos 25 años algunas regiones han perdido hasta el 8% de sus bosques, pues tan solo en 2007 ya se había perdido lo equivalente a medio millón de hectáreas por año (López y Monterroso, 2024).

A nivel local, para el caso del estado de Veracruz, entidad federativa que ocupa el tercer lugar en biodiversidad, la situación es similar, pues ha experimentado un alto porcentaje de deforestación para plantaciones agroforestales, café bajo sombra, cultivos de caña de azúcar, pastizales inducidos, y la agricultura de temporal, lo que ha traído una fragmentación del paisaje (Hernández-Pérez *et al.,* 2022). Asimismo, se ha hecho uso de la tierra para la ganadería, ocupando en 2022, 106.072 hectáreas para esta actividad en el DDR de Coatepec, correspondiente al 35.94% del territorio distrital (Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Veracruz (CEIEG), 2023).

El objetivo de este trabajo es analizar las transiciones y cambios de uso del suelo, para identificar las actividades que tiene la región DDRC para su desarrollo, tanto ambiental como socioeconómico, así como sus impactos y áreas relacionadas principalmente con la expansión agrícola y la urbanización.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio fue el Distrito de Desarrollo Rural de Coatepec, Veracruz, México (DDRC), ubicado dentro de la región Capital, conocida también región Centro del estado de Veracruz, está conformado por 17 municipios representando el 4.11% de la superficie estatal y posee condiciones fisiográficas diversas que la hacen ambientalmente estratégica (INEGI, 2025).

Para el diseño experimental con ayuda de los Sistemas de Información Geográfica y debido a la gran cantidad de tipos de uso de suelo que maneja el INEGI, se realizó la reclasificación propuesta por Salas-Martínez *et al.* (2023), agrupándose por formaciones vegetales. Posteriormente, siguiendo la metodología de Guerra-Martínez (2022), se analizaron las cartas de Uso de Suelo y vegetación de las series II y VIII, escala 1:250000 de INEGI, disponibles en su plataforma. Finalmente, la información fue procesada en QGIS 3.34.9 para la elaboración y posterior comparación entre los mapas y gráficos temáticos.

Un análisis estadístico cuantitativo se realizó siguiendo la metodología de Guerra-Martínez (2022) y utilizando la fórmula de la FAO (1996) propuesta por el mismo:

$$t = \left(\frac{S2}{S1}\right)^{\frac{1}{n}} - 1$$

Donde:

t = Tasa de cambio (para expresarse en porcentaje se debe multiplicar por 100)

S1 = Superficie del uso de suelo en el tiempo 1

S2 = Superficie del uso de suelo en el tiempo 2

n = Número de años transcurridos entre los dos periodos.

Se calcularon tasas anuales y relativas de cambio de uso de suelo y realizaron las matrices de cambio para analizar transiciones del periodo 2001–2021.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los mayores contrastes mostraron el aumento de las zonas urbanas, pastizales y la agricultura de riego, ocupando extensiones de las coberturas boscosas y de vegetación de temporal principalmente.

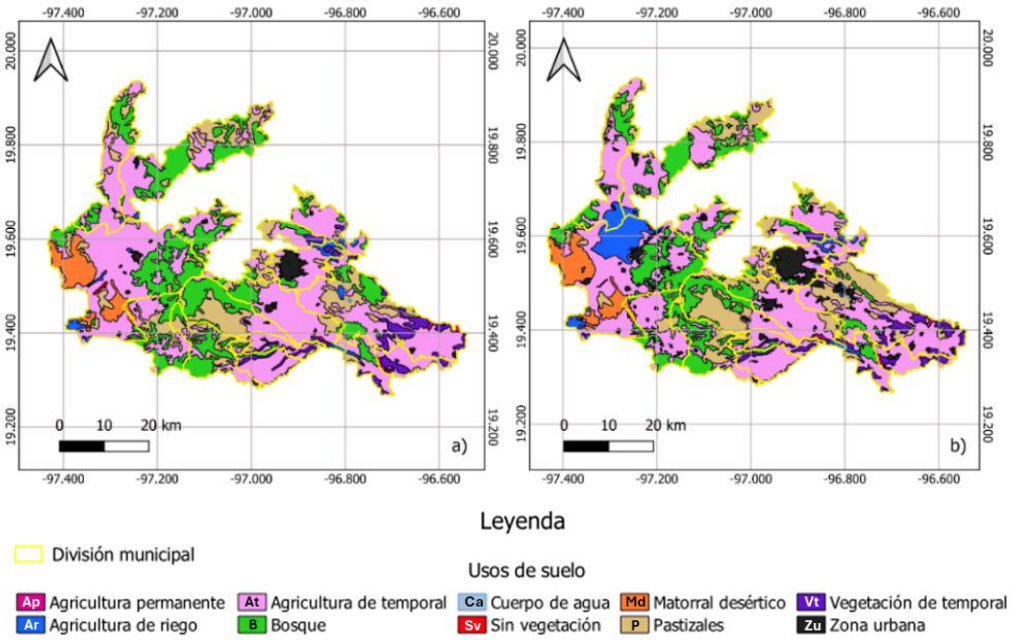


Figura 1. Comparación de los usos de suelo del año 2001 (izquierda) y 2021 (derecha).

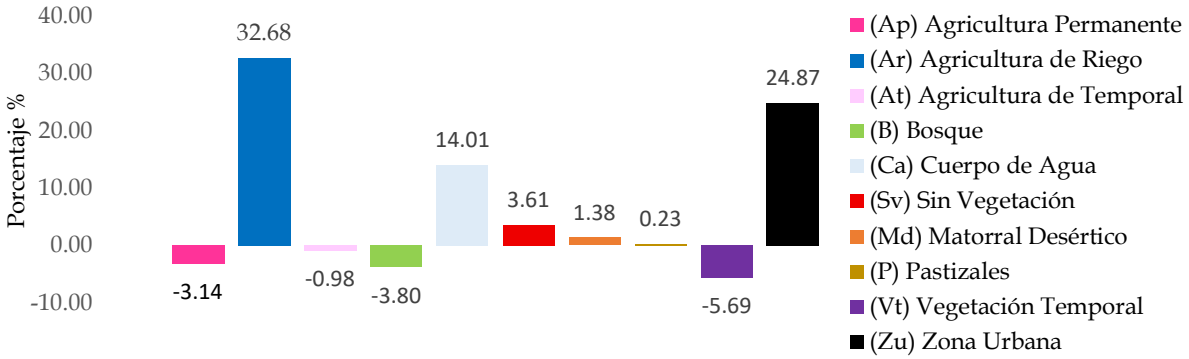


Figura 2. Porcentaje de las tasas de cambio de las diferentes coberturas vegetales de 2001-2021.

El mayor cambio en la cobertura vegetal en estos 20 años fue el posible aprovechamiento de las zonas sin vegetación (78.00%) a una agricultura de temporal, la cual incrementó su cobertura en 111.71% y extendiéndose en todas las coberturas. También se encontró la expansión de la zona urbana, con un incremento del 11.74%. Se identificó la pérdida significativa de la agricultura permanente con una disminución del

11.51% y de riego con 8.27%, también de los cuerpos de agua con una pérdida del 11.00% y solo una ganancia de otras coberturas del 1.36%.

Cuadro 1. Matriz de cambio, pérdida y ganancia de coberturas vegetales 2001-2021.

		2021									**%**
	Uso de suelo	Ap	**Ar**	**At**	**B**	**Ca**	**Sv**	**Md**	**P**	**Vt**	**Zu**	**Pérdida superficie original**
2001	Ap	87.13	0.27	3.56	0.39	0.00	0.00	0.00	0.21	8.42	0.02	12.87
	Ar	1.31	82.98	8.73	0.00	0.00	0.03	0.10	2.55	0.10	4.20	17.02
	At	0.01	6.78	82.90	2.66	0.01	0.10	0.34	2.23	1.41	3.54	17.10
	B	0.00	0.00	10.30	84.34	0.00	0.06	0.16	4.73	0.01	0.39	15.66
	Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	88.98	0.00	0.00	10.41	0.00	0.62	11.02
	Sv	0.00	0.00	78.23	0.00	0.00	21.77	0.00	0.00	0.00	0.00	78.23
	Md	0.00	0.03	2.73	0.53	0.00	0.00	95.36	0.15	0.00	1.21	4.64
	P	0.00	1.33	12.50	8.69	0.01	0.03	0.86	74.24	0.07	2.26	25.76
	Vt	0.05	0.16	11.38	0.09	0.00	0.00	0.00	10.45	76.53	1.33	23.47
	Zu	0.00	0.17	1.37	0.24	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	98.16	1.84
	Incremento superficie de otras coberturas											
	%	1.36	8.75	128.81	12.61	0.02	0.23	1.49	30.77	10.02	13.58	

Estos cambios podrían estar dados por la combinación de factores ambientales sociales y económicos, como el crecimiento poblacional y el aumento de la esperanza de vida señalados en los censos de población y vivienda durante este periodo, la expansión de los centros urbanos como Xalapa, Coatepec y Emiliano Zapata promueven el aumento de las zonas urbanas ocupando coberturas forestales, destinadas a la agricultura y pastizales ahora como áreas habitacionales y comerciales. De igual manera, a mayor población mayor es la presión por brindar una seguridad alimentaria, por lo que la agricultura de temporal resulta la más viable por su baja dependencia a la inversión para su riego, pues la pérdida de cuerpos de agua debido a su sobrexplotación para el consumo urbano y para las actividades agrícolas implican una escasez hídrica en la región que dificulta la práctica de la agricultura permanente y de riego.

CONCLUSIONES

Entre 2001 y 2021, el DDRC ha enfrentado una transformación significativa de su territorio. La expansión urbana y agrícola, seguida del aumento de pastizales destinados a la ganadería, genera pérdidas en coberturas naturales, especialmente en zonas forestales. La disminución de los cuerpos de agua podría explicar el porqué de la disminución de la agricultura permanente que depende de fuentes constantes de agua y de riego. Evaluar estos cambios de uso de suelo permite identificar en qué medida se ha perdido o ganado territorio de una cobertura, señalando como se ha expandido la mancha urbana, como ha sido la dinámica en cuanto a los tipos de agricultura y como se ha perdido la cobertura natural, así como los cuerpos de agua, mostrando así un

panorama de los riesgos asociados a dichas dinámicas, como la pérdida de la biodiversidad, la erosión del suelo, y la escasez hídrica que limita la viabilidad de diversos cultivos como el café por mencionar algunos ejemplos. Además de aportar evidencia científica, este tipo de evaluaciones fungen como herramientas para la planeación de desarrollo urbano y rural, el ordenamiento territorial y la gestión de políticas públicas orientadas al desarrollo sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al equipo de trabajo que contribuyó al desarrollo de esta investigación. Este estudio forma parte de un proyecto de investigación realizado con apoyo de beca otorgada (CVU 2042718) por la Secretaría De Ciencias Humanidades Tecnología E Innovación (SECIHTI) dentro del programa de Maestría en Desarrollo Regional Sustentable del Colegio de Veracruz.

BIBLIOGRAFÍA

Comité Estatal de Información Estadística y Geográfica de Veracruz (CEIEG). (2023). Cuadernillos Municipales 2023. Comité de Información Estadística y Geográfica del Estado de Veracruz. http://ceieg.veracruz.gob.mx/2023/08/31/cuadernillos-municipales-2023/.

Guerra-Martínez, F. (2022). QGIS. Cambio de cobertura y uso del suelo. Curso completo con datos oficiales (proceso vectorial) - YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=51ErOj8JlrU&t=751s.

Hernández-Pérez, E., García-Franco, J. G., Vázquez, G. & Cantellano de Rosas, E. (2022). Land-use change and landscape fragmentation in central Veracruz, Mexico (1989–2015). *Madera y Bosques*, 28(1). https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812294.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2025). Cartas de Uso de Suelo y Vegetación (Continuo nacional) Series II y VII. https://www.inegi.org.mx/app/mapas

Meza-Rodríguez, D., Olguín-López, J. L., Quintero-Gradilla, S. D., Sánchez-Rodríguez, E. V. & Villalvazo-López, V. M. (2023). Temporary dynamics of the change of land use and vegetation in the Juluapan watershed in the state of Colima. *Terra Latinoamericana,* 41. https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1317

Pineda-Pastrana, O. (2011). Análisis De Cambio De Uso De Suelo Mediante Percepción Remota En El Municipio De Valle De Santiago.

Salas-Martínez, F., Valdés-Rodríguez, O. A., Palacios-Wassenaar, O. M., Márquez-Grajales, A. & Rodríguez-Hernández, L. D. (2023). Methodological estimation to quantify drought intensity based on the NDDI index with Landsat 8 multispectral images in the central zone of the Gulf of Mexico. *Frontiers in Earth Science,* 11, 1027483. https://doi.org/10.3389/FEART.2023.1027483/BIBTEX.

INTERACCIÓN DEL SUELO Y MANEJO EN LAS CARACTERÍSTICAS DE UVAS DE DOS VIÑEDOS DE GUANAJUATO

Luis Felipe Ramírez Santoyo[1]; Fabio Macías Gallardo[2]; Gabriela Ana Zanor[3]; César Ozuna López[4]

[1] Departamento de Agronomía, División de Ciencias de la Vida Universidad de Guanajuato. Carretera Irapuato-Silao Km. 9 ex hacienda el Copal, Irapuato 36500, México.
[2] Posgrado en Biociencias, División de Ciencias de la Vida Universidad de Guanajuato. Carretera Irapuato-Silao Km. 9 ex hacienda el Copal, Irapuato 36500, México.
[3] Departamento de Ciencias Ambientales, División de Ciencias de la Vida Universidad de Guanajuato. Carretera Irapuato-Silao Km. 9 ex hacienda el Copal, Irapuato 36500, México.
[4] Departamento de Alimentos, División de Ciencias de la Vida Universidad de Guanajuato. Carretera Irapuato-Silao Km. 9 ex hacienda el Copal, Irapuato 36500, México.

Correo del autor de correspondencia: santoyo@ugto.mx

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la relación entre el manejo agronómico y las propiedades fisicoquímicas del suelo, así como su influencia sobre los compuestos bioactivos de dos variedades de uvas: syrah y tempranillo (ubicados en Guanajuato). Uno de los viñedos tiene un manejo convencional y el otro un manejo orgánico. Se analizaron algunas propiedades del suelo como la MO, la textura y macro y microelementos. En los frutos se determinaron fenólicos, taninos y azúcares, entre otros. Con los resultados se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para determinar si las propiedades del suelo influyen en las propiedades de las uvas que se producen. De manera preliminar, se tiene que tanto las propiedades del suelo como: MO, textura, CIC, pH, CE, macro y microelementos, así como el manejo agronómico orgánico del viñedo influyen en las características de las uvas (taninos, fenólicos, antocianinas, acidez total y azúcares reductores y totales). Estos resultados destacan la importancia de realizar análisis más detallados del suelo bajo diferentes sistemas agronómicos.

PALABRAS CLAVE: *Manejo, multivariado, orgánico, terruño, uvas.*

INTRODUCCIÓN

Dentro de la producción en los viñedos se ha acuñado el concepto de "terruño" o terroir en viñedos de Francia, dentro de la cual se asocia a las características del medio ambiente, principalmente el suelo, el clima y el manejo (Cadet, 2005). El objetivo del presente trabajo, fue explorar y evaluar la relación entre el manejo agronómico, las propiedades fisicoquímicas del suelo y la influencia que estos tienen sobre los compuestos bioactivos de las uvas de las variedades syrah y tempranillo en dos viñedos del estado de Guanajuato. Asimismo, constituyó una primera aproximación en este tipo de estudios, debido a que no existen trabajos previos al respecto en la zona. Se plantea la hipótesis de que las características del suelo pueden influir en las características de las uvas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron dos viñedos, uno con manejo convencional y el otro con manejo orgánico. El primero se localiza en el municipio de Dolores Hidalgo, en las coordenadas (21°12'09" LN 100°50'55" LW, 1 y a ,1989 msnm). Se utiliza un sistema de irrigación por goteo con fertilización química en un Phaezoem lúvico. El segundo se localiza en el municipio de San Miguel de Allende, con coordenadas (20°54'36" N 100°40'44" W, y a 2,034 msnm). Se utiliza un sistema de irrigación con lixiviados de composta en un suelo Vertisol pélico. En ambos viñedos las uvas se protegen con mallas plásticas para evitar el daño ocasionado por el ataque de pájaros e insectos. En ambos viñedos se cultivan las variedades syirah y tempranillo, cuya edad de las plantas es de 12 años.

Muestreo de suelos. En julio de 2023, en cada viñedo se recolectaron 24 muestras compuestas de suelo a una profundidad de 30 cm mediante el método zigzag de las cuales se determinaron la textura, MO, pH, CIC, macro y microelementos de acuerdo con los procedimientos de la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Diario Oficial de la Federación, 2002).

Muestreo de frutos. En cada viñedo y de cada variedad, se recolectaron 24 muestras compuestas representativas de frutos de uvas, las cuales fueron debidamente conservadas en frío hasta el momento de las determinaciones analíticas. Se analizaron los compuestos bioactivos como: fenólicos, antocianinas, taninos, acidez total, azúcares reductores y totales. Se siguieron las técnicas analíticas propuestas por Biniaria *et al*. (2020); Jackson (2020); Garaguso y Nardini (2015); Garrido y Borges (2013); Linskers y Jackson (1988); Somers y Evans (1977).

Análisis estadístico. Se realizó un análisis de varianza y pruebas de medias con el programa Minitab 21. Adicionalmente se realizó un análisis de componentes principales (PCA) con el programa Jamovi 2.6.26.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados analíticos y estadísticos de las muestras de los suelos se muestran en los (Cuadros 1 y 2). Se encontraron valores significativamente distintos para los dos viñedos estudiados, destacando la MO, CE y CIC que presentaron valores mayores para el suelo del viñedo orgánico.

Respecto a los resultados de los análisis de frutos de uvas (Cuadro 3), indica que se presentan valores significativamente diferentes entre los viñedos, siendo más altos en el viñedo convencional a excepción de las variables: taninos, sólidos solubles totales y acidez total, las cuales presentaron valores más altos para el viñedo orgánico.

La interacción entre el complejo arcillo-húmico del suelo y la disponibilidad de nutrientes como P, K, Ca, Mg, fue determinante para el perfil nutracéutico de las uvas. Lo cual coincide con lo encontrado por Biniaria *et al*. (2020) y Cadet (2005) para vid, en Grecia y Francia, respectivamente. El contenido de materia orgánica favoreció la porosidad, retención de iones y de humedad, así como la disponibilidad de formas asimilables de Fe, Zn y Mn, tal como lo señala Jackson (2020).

Cuadro 1. Propiedades químicas de los suelos en dos viñedos de Guanajuato.

viñedo	Materia orgánica	Macroelementos P	K	Ca	Mg	Na	Microelementos S	Fe	Zn	Mn	B	pH	CE
		%					ppm						dS cm^{-1}
Orgánico	2.2 a	0.01 a	0.07 a	0.57 b	0.16 a	107.3 b	325.7 a	2.37 a	2.21 b	19.4 a	1.2 b	8.1 b	0.47 a
Convencional	1.2 b	0.01 a	0.05 b	0.75 a	0.06 b	203.2 a	167.8 b	0.04 b	4.18 a	7.6 b	1.8 a	8.5 a	0.30 b

Los datos corresponden a la media para n = 24. letras diferentes indican diferencias significativas en P ≤ 0.05 (prueba de Tukey).

Cuadro 2. Fracciones de partículas (Textura) y Capacidad de intercambio catiónico (CIC) de los suelos de viñedos de Guanajuato, julio de 2023.

viñedo	**arena**	**arcilla**	**limo**	**CIC**
		%		meq 100 g
Orgánico	41.06b	36.12a	22.81a	44.1a
Convencional	51.11a	29.88a	19.01b	39.01b

Los datos corresponden a la media para n = 24. letras diferentes indican diferencias significativas en P ≤ 0.05 (prueba de Tukey).

Cuadro 3. Análisis practicados a uvas (*Vitis vinifera* L.) de viñedos de Guanajuato, julio de 2023.

viñedo	**pH**	**Fenólicos**	**Antocianinas**	**Taninos**	**Sólidos Solubles Totales**	**Acidez total**	**Azúcares**	
							reductores	**Totales**
				mg g de peso fresco				
Orgánico	3.74b	16.43b	9.29b	0.27 a	21.86a	5.68a	52.27b	55.52b
Convencional	3.91a	22.37a	11.35a	0.22 b	24.36b	4.18b	56.53a	58.66a

Los datos corresponden a la media para n = 24. letras diferentes indican diferencias significativas en P≤0.05 (prueba de Tukey).

El análisis de componentes principales (PCA), entre propiedades del suelo (Cuadros 1 y 2) y propiedades de los frutos de uva (Cuadro 3), donde se consideró como factor de agrupación el esquema de manejo (convencional u orgánico). Se obtuvo una nube de datos más compacta para el viñedo con manejo orgánico y una más extendida para el viñedo convencional. En este tipo de análisis, formas más compactas y redondeadas indican mayor efecto que las dispersas y alargadas (Seol, 2023), lo cual se aprecia en la Figura 1, la cual explica el 77.6% de la varianza, 60.1% en la dimensión 1 y 17.5% en la dimensión 2.

Mientras que el PCA entre propiedades del suelo (Cuadros 1 y 2) y propiedades de las uvas (Cuadro 3) tomando como factor de agrupación a la variedad (syirah o tempranillo). Para ambas las variedades, se observaron nubes de datos extendidas y alargadas (Seol, 2023). Lo cual se aprecia en la Figura 2 (que explica el 77.4% de la varianza, 59.5% en la dimensión 1 y 17.9% en la dimensión 2). Al comparar la Figura 1 y la Figura 2, se aprecia que existió mayor efecto por manejo agronómico orgánico del viñedo que por la variedad.

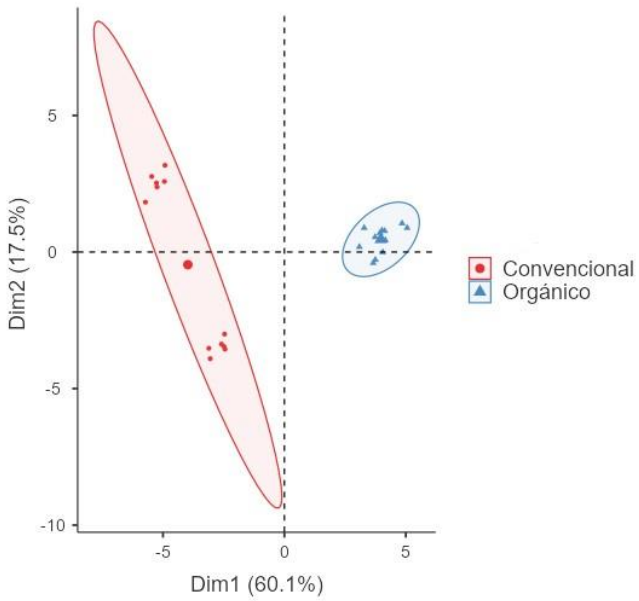


Figura 1. Análisis de componentes principales, agrupación de muestras por

CONCLUSIONES

Las características de suelo MO, textura, CE y CIC influyeron determinantemente en las características de las uvas obtenidas (taninos, fenólicos, antocianinas y azúcares reductores y totales). Lo anterior puede influir en las características de los vinos obtenidos. Estos resultados demostraron el potencial de las prácticas agrícolas para producir uvas de alta calidad para la vinificación, lo que destaca la importancia de un análisis del suelo y una gestión adecuada para satisfacer las necesidades específicas del viñedo. El presente estudio reafirmó que el manejo agrícola, en particular con enfoque orgánico y las propiedades del suelo, influyeron positivamente en la biosíntesis de compuestos bioactivos en la uva; sin embargo, se requiere profundizar en algunos aspectos particulares.

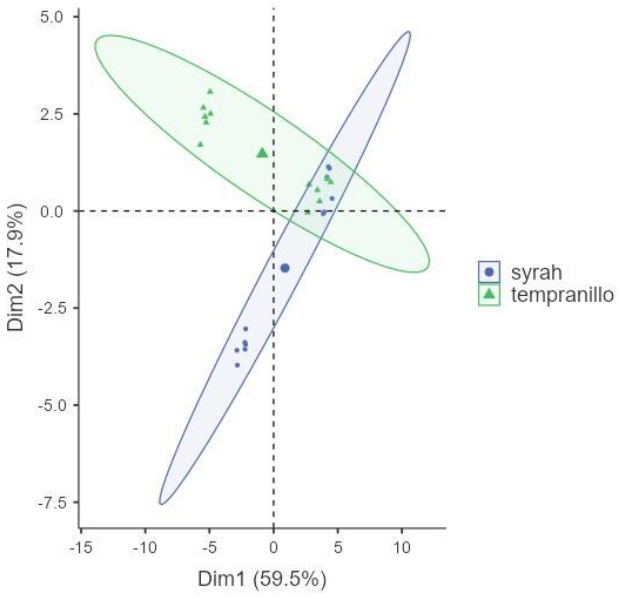


Figura 2. Análisis de componentes principales, agrupación de muestras por variedad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los responsables de los viñedos: “Cuna de Tierra” y “Dos Búhos”, por las facilidades otorgadas en la toma de muestras.

BIBLIOGRAFÍA

Biniaria, K. Xenakia, M. Daskalakisa, I. Rusjanb, D. Bouzaa, D. & Stavrakakia, M. (2020). Polyphenolic compounds and antioxidants of skin and berry grapes of Greek Vitis vinifera cultivars in relation to climate conditions. *Food Chemistry*, 307 125518. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125518.

Cadet, A. (2005). Le cepage Vitis vinifera L. Cv. Fer servadou: etude de la nutrition minerale et des relations cepage, terroir, qualite du vin. These De Docteur De L´Institut National Polytechnique de Toulouse.

Garaguso, I. & Nardini, M. (2015). Polyphenols content, phenolics profile and antioxidant activity of organic red wines produced without sulfur dioxide/sulfites addition in comparison to conventional red wines. *Food Chemistry*, 179, 336-342. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.144.

Garrido, J. & Borges, F. (2013). Wine and grape polyphenols - A chemical perspective. *Food Research International*, 54(2), 1844–1858. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.08.002.

Jackson, R.S. (2020). Wine science: principles and applications. Academic Press.

Linskens, H.F. & Jackson, J.F. (1988). Wine Analysis. In: Linskens, HF., Jackson, J.F. (eds.) Wine Analysis. Modern *Methods of Plant Analysis*, 6 (pp 92-112). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-83340-3.

Minitab, LLC. (2021). Minitab. Recuperado de https://www.minitab.com.

SEMARNAT Norma Oficial Mexicana. NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación, 31 diciembre 2002. Diario Oficial de la Federación (2002). Norma Oficial Mexicana, NOM-021-RECNAT-2000. SEMARNAT.

Seol, H. (2023). snowCluster: Multivariate Analysis. (Version 7.1.7) [jamovi module]. URL https://github.com/hyunsooseol/snowCluster.

Somers, T. C. & Evans, M. E. (1977). Spectral evaluation of young red wines: anthocyanin equilibria, total phenolic, free, and molecular SO2, chemical age'. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 28, 279–287.

The jamovi project (2024). jamovi. (Version 2.6) [Computer Software]. https://www.jamovi.org (06/07/25).

ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA POTENCIAL DE TRES MICROCUENCAS EN EL OCCIDENTE DEL PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL

Fátima Guadalupe Roldán Ramírez[1]; Juan Manuel Valderrábano Gómez[1]; Alma Bella López López[1]; Gerardo Cruz Flores[1]

[1] Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM. Batalla 5 de Mayo s/n, col. Ejército de Oriente Alcaldía Iztapalapa, C.P. 09230, CDMX, México.

Correo del autor de correspondencia: fatimarorm@gmail.com

RESUMEN

La erosión es un proceso que afecta significativamente la calidad del suelo y sus ecosistemas. En este proyecto de investigación se estimó la erosión hídrica potencial del suelo en tres microcuencas del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl y su área de influencia. El objetivo fue estimar la tasa de erosión hídrica potencial mediante la aplicación del modelo RUSLE, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se seleccionaron las microcuencas Chopanac, Alcalica y Amalacaxco, ubicadas en el occidente del volcán Iztaccíhuatl. Se utilizaron datos climáticos, edáficos y topográficos para obtener los factores R, K y LS respectivamente. El factor R se calculó mediante el modelo geoestadístico Spline con datos de precipitación de 22 estaciones; el factor K derivó de la textura y tipo de suelo de la carta edafológica E14-2; y el factor LS se obtuvo a partir de un modelo digital de elevación. Los resultados mostraron que las tres cuencas tienen un potencial de erosión de moderado a alto. Alcalica fue la de mayor área afectada (54.29%) con potencial alto; seguida de Chopanac (50.44%) y Amalacaxco (45.49%) con potencial moderado. Las zonas con pendientes pronunciadas mostraron mayor vulnerabilidad. Se concluye que la aplicación del modelo RUSLE en conjunto con los SIG permite eficazmente estimar la erosión hídrica potencial del suelo, facilitando la identificación de áreas con distintos niveles de susceptibilidad a la pérdida de éste, y es una herramienta clave para manejo territorial, restauración ecológica y prevención de procesos erosivos en microcuencas prioritarias.

PALABRAS CLAVE: *Cuenca hidrográfica; ecuación universal de pérdida de suelo revisada; erosión de suelo; sistemas de información geográfica.*

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica se refiere al desprendimiento y transporte de las partículas del suelo bajo la acción del agua, por lo que se modifica la estructura, estabilidad de agregados, capacidad de infiltración y contenido nutrimental del suelo. En consecuencia, se modifica el potencial del suelo para sostener vegetación, biodiversidad y proveer servicios ecosistémicos. La tasa y magnitud de la erosión están controladas principalmente por la intensidad de la lluvia, la erodabilidad de los suelos, la pendiente del terreno y la cubierta vegetal. En México, las zonas afectadas por erosión hídrica alcanzan el 11.8% del territorio

nacional (22.73 millones de ha), sobre todo en las zonas montañosas (SEMARNAT, 2018). La habilidad para predecir estos efectos es clave para la planeación de la conservación de los suelos, considerando que la mayor parte de la población de América Central se concentra en las partes medias y bajas de las cuencas hidrográficas y depende del manejo de las zonas altas de captación de agua y de las zonas de ribera (Ceccon, 2017).

Esto impulsa el estudio y predicción de la erosión hídrica para el desarrollo e implementación de acciones de conservación de estos ecosistemas, así como la actualización de mapas de erosión potencial para el desarrollo de planes adecuados de manejo. Para responder a esta necesidad, se han desarrollado diversos modelos para predecir la erosión del suelo, como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada o RUSLE, por sus siglas en inglés. Esta ecuación permite estimar la pérdida de suelo promedio anual en una superficie expuesta a la erosión laminar y en surcos, cuyo proceso es controlado por el clima, el relieve, el suelo mismo y sus usos, la cubierta vegetal y las prácticas de conservación presentes en el área; es expresada como masa por unidad de área por unidad de tiempo (t ha^{-1} $año^{-1}$) (Chitalogro y Llamatumbi, 2021).

Por lo que en este proyecto de investigación se aplicó el modelo RUSLE en conjunto con Sistemas de Información Geográfica (SIG), para estimar la tasa de erosión hídrica potencial de tres microcuencas en la zona occidental del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl; los objetivos específicos comprendieron la obtención de las tasas de erosión hídrica potencial, así como los respectivos mapas para la visualización del potencial de pérdida de suelo de cada una de las microcuencas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl se encuentra en la parte centro-oriental de la Faja Volcánica Transmexicana, ocupa una parte sustancial de la Sierra Nevada (CONANP, 2013). Para llevar a cabo el estudio establecido, se eligieron tres microcuencas en la vertiente occidental de la Sierra: Chopanac, Alcalica y Amalacaxco, localizadas en el municipio de Amecameca, Estado de México.

La RUSLE toma en cuenta 6 factores, sin embargo, para el cálculo de la erosión potencial sólo se multiplicaron los factores (R) de erosividad de la lluvia; (K) de erodabilidad del suelo, (L) longitud y (S) grado de inclinación de la pendiente (Montes *et al.,* 2011; Renard *et al.,* 1997). El proyecto se desarrolló en el transcurso de 4 meses y se utilizó un software de uso libre para la obtención de las imágenes ráster de cada factor de la ecuación, como se describe a continuación.

Para obtener R, se construyó una base de datos de precipitación media anual total de 22 estaciones climatológicas dentro y fuera del Parque Nacional, con datos de precipitación de 30 años al presente de la base de datos de CONAGUA. Posteriormente se utilizó el modelo geoestadístico Spline tipo "Tension" en el SIG, para interpolar los datos a las áreas totales de las microcuencas de estudio. Finalmente se aplicó la ecuación propuesta por Cortés (1991) para obtener el raster final de este factor.

El factor K se obtuvo a partir de las clases texturales y tipos de suelo reportados en las microcuencas de estudio por el Conjunto de Datos Vectoriales Edafológico, escala 1:250 000, Serie II del Continuo Nacional Ciudad de México (2007), obtenido en el portal de

INEGI. Se asignaron valores a cada polígono de acuerdo a la metodología de la FAO (1980), con dichos datos de clase textural y tipo de suelo.

Para L y S se utilizó un Modelo Digital de Elevación (MDE) de 5 m de resolución obtenido de la página electrónica de INEGI en formato TIFF. Se le aplicó primero un relleno con la herramienta "Fill" para evitar errores en los valores de los píxeles (Castro *et al*., 2017), posteriormente se obtuvo el ráster de pendiente en grados con la herramienta "Slope" para cada microcuenca. Se aplicaron las ecuaciones desarrolladas por McCool *et al*. (1997) que toman en cuenta la longitud de la pendiente, para el subfactor L, y el ángulo medio de todos los píxeles en la dirección de mayor pendiente, para el subfactor S.

Finalmente, para obtener la tasa de erosión potencial, se multiplicaron los rásteres de los factores R, LS y K con la herramienta "Raster calculator". Una vez generado el ráster, se reclasificaron los valores obtenidos de acuerdo a la clasificación del grado de erosión hídrica potencial de la FAO (1979) como lo reportó Flores (2016) y, por último, se obtuvo el porcentaje de área afectada por cada clase de erosión en cada microcuenca de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el factor R se obtuvieron intervalos de erosividad de la lluvia de 646.66 a 729.68 Mj/ha mm/h, 672.24 a 787.82 Mj/ha mm h^{-1} y 738.06 a 833.48 Mj/ha mm/h para Amalacaxco, Alcalica y Chopanac respectivamente. En el factor K, el valor que domina la superficie de las tres microcuencas es 0.0266, dado por Andosol húmico, Regosol dístrico y Litosol, con una textura media. El factor LS es adimensional y aumenta con la longitud y la inclinación de la pendiente, por lo que cuanto mayor es la pendiente del terreno, mayor es la velocidad y el poder erosivo de la escorrentía superficial. Se obtuvo un valor máximo de 40.36 para Alcalica, evidenciando la presencia de zonas más altas y un valor mínimo de 0.03 en las zonas más planas de todas las microcuencas. En el caso de Amalacaxco y Chopanac se obtuvieron valores máximos de 27.17 y 14.93 respectivamente.

En el Cuadro 1 se presentan las clases y porcentajes de erosión potencial obtenidos para cada microcuenca, del mismo modo, en la Figura 1 se visualiza la extensión del potencial de erosión en cada una de estas.

Cuadro 1. Clases y porcentajes de erosión potencial de las microcuencas de estudio.

Clase	ton/ha/año	Porcentaje de área		
		Amalacaxco	Alcalica	Chopanac
			(%)	
Nula	0 -2	0.99	0.66	1.77
Ligera	2 - 10	12.92	3.77	5.70
Moderada	10 - 50	45.49	41.09	50.44
Alta	50 -200	40.58	54.29	41.95
Muy alta	> 200	0	0.16	0.12

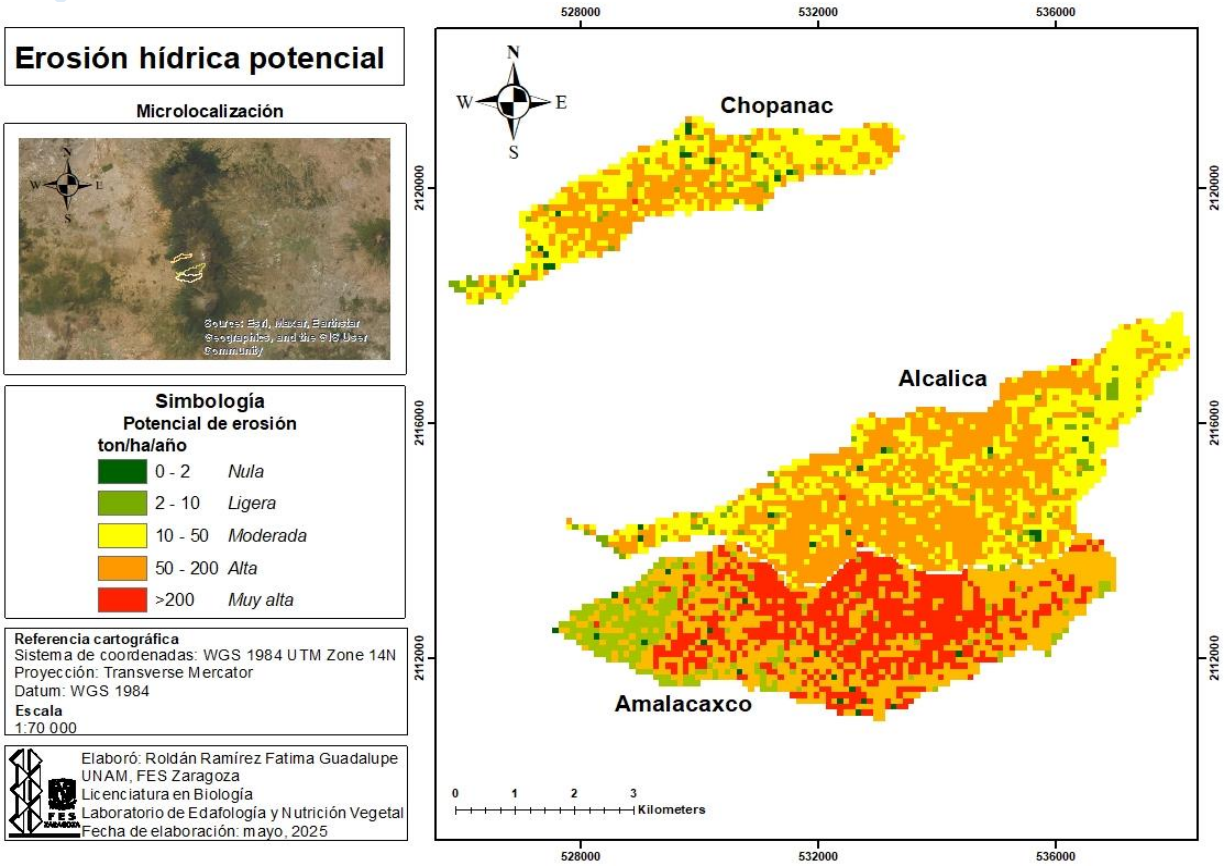


Figura 1. Erosión hídrica potencial en las cuencas de estudio.

Los resultados obtenidos en las tres microcuencas concuerdan con estudios previos que destacan la alta vulnerabilidad a la erosión hídrica en regiones montañosas con fuertes pendientes y coberturas vegetales en proceso de degradación, puesto que esta estimación excluye el factor de cobertura vegetal, resultando la tasa de pérdida de suelo si no existiera ningún tipo de cobertura de este. El análisis espacial muestra una dominancia de clases de potencial de erosión moderado a alto, lo cual coincide con el Mapa Nacional de Erosión Potencial obtenido por Montes *et al.* (2011), en el que gran parte de las zonas del Eje Neovolcánico presentan niveles similares de susceptibilidad. Así mismo, se confirma la influencia del relieve como factor determinante en estudios como el de Castro (2013), donde se señala que el factor LS es el que más impacta en la distribución espacial del potencial de erosión. Del mismo modo, se obtuvieron similitudes respecto a la concentración de áreas críticas en zonas de pendiente pronunciada respecto al trabajo de Castro *et al.* (2017). Los mapas generados permiten localizar zonas prioritarias para acciones de conservación con base en evidencia espacial confiable.

CONCLUSIONES

La aplicación del modelo RUSLE en conjunto con los SIG, permite eficazmente estimar y visualizar la erosión hídrica potencial en zonas montañosas con condiciones

fisiográficas complejas, logrando de esta forma identificar áreas con distintos niveles de susceptibilidad a la pérdida de suelo. Así mismo, los mapas generados constituyen una herramienta clave para orientar estrategias de manejo territorial, restauración ecológica y prevención de procesos erosivos en microcuencas prioritarias. Este estudio valida el uso de herramientas accesibles y datos disponibles públicamente para el análisis espacial de fenómenos ambientales, aportando una metodología sólida para el diseño de políticas de gestión sustentable en áreas protegidas.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto PAPIME PE214825 por otorgar el apoyo y recursos proporcionados durante el desarrollo de este proyecto de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

Castro, A., Lince, L. & Riaño, O. (2017). Determinación del riesgo de la erosión potencial hídrica en la zona cafetera del Quindío, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental,* 8(1), 17-26.

Castro, I. (2013). Estimación de pérdida de suelo por erosión hídrica en microcuenca de presa Madín, México. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 34(2), 3-16.

Ceccon, E. (2017). Resiliencia, resistencia, elasticidad y fragilidad de los ecosistemas ribereños de montaña. En G. Cruz Flores y E. Guerra Hernández (Eds.), *Ecosistemas ribereños de montaña: descripción y estudio* (pp. 107-119). UNAM, FES Zaragoza.

Chitalogro, V. & Llamatumbi, E. (2021). *Aplicación del Modelo USLE para estimar cuantitativamente la erosión hídrica de la microcuenca del río Chibunga*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Chimborazo]. Repositorio Digital UNACH.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2013). Programa de Manejo del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatépetl. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Cortés, T. (1991). Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. [Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados].

Flores, E. (2016). Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en tres cuencas de la República Mexicana, utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].

McCool, D. K., Foster, G. &Weesies, G. (1997). Slope-length and steepness factors (LS). En Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A, McCool, D.K. & Yoder, D.C. (Eds.) *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* (pp. 101-141). USDA Agriculture Handbook no. 703, Washington, D.C., USA.

Montes, M., Uribe, E. & García, E. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial, *Tecnología y Ciencias del Agua*, 2(1), 5-17.

Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A, McCool, D.K. & Yoder, D.C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. USDA Agriculture Handbook no. 703, Washington, D.C., USA.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2018. Compendio de Estadísticas Ambientales, Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y Crecimiento Verde. SEMARNAT.

ANÁLISIS DE SUELOS CULTIVADOS CON *Prunus persica* (L.) Batch. EN ALTZAYANCA, TLAXCALA

Paulina Sánchez Ventura[1]; Elizabeth Hernández Acosta[2]; Elizabeth García Gallegos[1]; Oscar Gumersindo Vázquez Cuecuecha[1]; Gema Lilia Galindo Flores[3]

[1] Maestría en Ciencias en Sistemas del Ambiente, CIGyA-UATx. Km. 10.5 Aut. Tlaxcala-San Martín. C.P. 90120. San Felipe Ixtacuixtla, Tlaxcala.
[2] Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Suelos. C.P. 56230. Texcoco, Estado de México.
[3] Centro de Investigación en Ciencias Biológicas (CICB)-UATx. Km. 10.5 Aut. Tlaxcala-San Martin. C.P. 90120. San Felipe Ixtacuixtla, Tlaxcala.

Correo del autor de correspondencia: ehernandeza@chapingo.mx

RESUMEN

El suelo es un recurso fundamental para la productividad agrícola y frutícola, cuya calidad puede ser modificada por las prácticas de manejo. Se evaluó el efecto del manejo orgánico e inorgánico sobre las propiedades físicas y químicas de suelos cultivados con *Prunus persica* Batsch cv Escarcha y Rocío, en Altzayanca, Tlaxcala. Se seleccionó una parcela con manejo orgánico y la otra con manejo inorgánico, ambas con las variedades Escarcha y Rocío, de cada parcela por variedad se recolectaron ocho muestras simples de suelo a 0–30 cm de profundidad. Se determinó textura, densidad aparente, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, macronutrientes y micronutrientes. Los datos se analizaron bajo un modelo lineal anidado, previo se verificó la normalidad de los datos por Shapiro Wilks ($p > 0.05$), posterior un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias por el método Tukey ($p < 0.05$). Los resultados mostraron que el manejo orgánico en el suelo cultivado con durazno cv. Escarcha presentó valores significativamente mayores de pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y conductividad eléctrica, así como fósforo, potasio, calcio, magnesio, zinc, boro, hierro y sodio en comparación con el manejo inorgánico. Se concluye que el manejo orgánico mejora las propiedades físicas, químicas del suelo, así como su condición nutrimental, lo que contribuye a una producción frutícola más eficiente y respetuosa con el recurso suelo.

PALABRAS CLAVE: *Durazno; fruticultura; nutrimentos; propiedades del suelo*, *suelos volcánicos*.

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural esencial no renovable que desempeña funciones fundamentales en los agroecosistemas, tales como el soporte físico, la retención de agua, nutrimentos y el mantenimiento de la biodiversidad edáfica (Zabaloy, 2021). La fertilidad del suelo, determinada por las propiedades físicas, químicas y biológicas, puede ser alterada por las prácticas de manejo (Nannipieri *et al.,* 2003). El durazno (*Prunus persica* (L.) Batsch) es una especie frutal de alto valor económico que se cultiva en diversas regiones templadas del mundo. De acuerdo con datos del Instituto para la Innovación

Tecnológica en la Agricultura para el año 2020, México ocupaba el 17° lugar en la producción de durazno a nivel mundial, esto por la gran diversidad de climas que favorecen su cultivo. Los estados de Michoacán, Puebla, Chihuahua, Zacatecas y el Estado de México, aportaron el 70.1% de la producción nacional posicionándose como las principales entidades productoras del país. De manera particular en Tlaxcala, en el año 2023 se tuvo una producción de durazno de 9,806.28 t y en el municipio de Altzayanca 8 603.26 t (SADER, 2023).

El cultivo del durazno requiere suelos con buena aireación, textura franca o franco-arenosa, adecuada disponibilidad de nutrimentos, suficiente materia orgánica y un pH entre 6 y 8 (Agustí, 2010; SIAP, 2016). Sin embargo, el manejo convencional basado en la fertilización inorgánica suele basarse en el uso de fertilizantes, lo que puede provocar desequilibrios edáficos a largo plazo (Fernández-Montes *et al.*, 2010). En contraste, el manejo orgánico incluye prácticas como la incorporación de abonos orgánicos, lo que promueve la fertilidad del suelo e incrementa la producción. García *et al*. (2020) reportaron que en suelos de Altzayanca cultivados con *Prunus persica* cv. Escarcha, la incorporación de composta durante el mes de noviembre por ciclo del cultivo, se tuvo un pH de 6.6, un contenido de materia orgánica de 1.01%, N total de 0.23 mg kg^{-1}, y P de 40.33 mg kg^{-1}, lo que permitió obtener un rendimiento de a 11.66 t ha^{-1}, en comparación con un manejo a base de fertilizantes con un rendimiento de 10.88 t ha^{-1}.

Debido a lo anterior, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de los manejos orgánico e inorgánico sobre las propiedades físicas y químicas de suelos cultivados con *Prunus persica* (cv. Escarcha y Rocío) en el municipio Altzayanca, Tlaxcala, con el propósito de contribuir a la gestión sostenible del recurso suelo en sistemas frutícolas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron dos parcelas de 2,500 m^2, una con manejo orgánico (incorporación anual de abonos orgánicos, control manual de malezas, riego por goteo, cultivos en surco) y otra con manejo inorgánico (aplicación de urea y caldo de bordelés y cultivo por temporal), en ambas cultivadas con árboles de durazno de las cultivares Escarcha y Rocío, con una edad de 13 años. Las parcelas se localizan en la comunidad La Concepción Hidalgo, perteneciente al municipio de Altzayanca, Tlaxcala (19° 25′ 43″ Norte, 97° 47′ 46″ Oeste), situado en el Altiplano Central Mexicano, a una altitud promedio de 2 580 m s.n.m. con un clima templado subhúmedo y lluvias en verano, una temperatura de 10 a 14 °C y precipitación de 600 a 900 mm (INEGI, 2010). Durante la época de sequía y reposo del frutal, de cada parcela y por cultivar, fueron recolectadas en zig-zag ocho muestras simples a una profundidad de 0-30 cm. Las muestras se secaron a temperatura ambiente y a la sombra, tamizadas con malla de 2 mm para determinar: densidad aparente (DA), textura, pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), macronutrientes (N inorg, P, K, Ca, Mg) y micronutrientes (Cu, Mn, Zn, Fe, B, Na) con base a los métodos establecidos en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002).

Para el análisis de los datos se consideró un diseño experimental anidado con dos factores: tipo de manejo (orgánico e inorgánico) y cultivar de durazno (Escarcha y Rocío),

con 4 repeticiones. Los datos se sometieron a la prueba de normalidad mediante (Shapiro–Wilk, $p > 0.05$), seguida de un análisis de varianza (ANOVA) y a una prueba de comparación de medias por el método de Tukey ($p < 0.05$) para identificar diferencias significativas entre tipos de manejo y variedades por parcela y entre parcelas, se utilizó el modelo estadístico $Y_{ijk} = \mu + P_i + V_j(_i) + \varepsilon_{ijk}$, donde: Y_{ijk}=variable respuesta, μ= media general, P_i=valor del i-ésimo factor parcela, $V_j(_i)$=valor del j-ésimo valor de la variedad dentro del i-ésima parcela, ε_{ijk}= error experimental, se empleó el paquete estadístico InfoStat versión libre 2020.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos analizados presentaron un porcentaje de arena superior al 70%, lo cual constituye una condición favorable para cultivos frutales, debido a su buen drenaje y adecuada aireación (Brady y Weil, 2017). Sin embargo, este tipo de suelo puede presentar limitaciones en cuanto a la retención de agua y nutrimentos, haciéndolo más susceptible a procesos de lixiviación (Farias-Barrero *et al.,* 2017). La densidad aparente osciló entre 1.29 y 1.40 g cm^{-3}, con diferencias significativas ($p < 0.05$), en específico entre el suelo proveniente del cv. Escarcha bajo manejo inorgánico y su contraparte orgánica (Cuadro 1). Estos valores superan el límite recomendado para suelos volcánicos (< 1 g cm^{-3}) establecido por la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002), lo que puede indicar una mayor compactación y en consecuencia posibles restricciones al desarrollo del sistema radicular.

Cuadro 1. Propiedades físicas, químicas y concentración de nutrimentos del suelo bajo el cultivo de durazno en Altzayanca, Tlaxcala.

Parámetro	Manejo orgánico		Manejo inorgánico	
	cv. Escarcha	cv. Rocío	cv. Escarcha	cv. Rocío
DA (g cm^{-3})	1.29 ± 0.03 b	1.39 ±0.00 ab	1.40 ±0.04 a	1.38±0.01 ab
pH	7.51±0.19 a	6.81±0.42 ab	6.14 ±0.17 b	6.03 ±0.08 b
MO (%)	1.79±0.30 a	1.06±0.14 ab	0.79 ±0.09 b	0.64 ±0.10 b
CIC [$Cmol^{(+)}$ kg^{-1}]	7.29±1.40 a	4.66±0.52 ab	3.95 ±0.04 b	3.76 ±0.23 b
CE (dS m^{-1})	0.28±0.12 a	0.23±0.06 ab	0.05 ±0.01 b	0.04 ±0.03 b
N inorg (mg kg^{-1})	195.32±68.87 ab	257.79±63.66 a	57.5±2.29 b	50.2±1.36 b
P (mg kg^{-1})	92.7±12.16 a	79.67±33.57 a	56.14±19.79 a	36.81±11.14 a
K (mg kg^{-1})	1214±62.51 a	458±51.39 a	408.67±48.13 a	309.33±52.62 a
Ca (mg kg^{-1})	939.16±19.10 a	809.59±26.13 ab	443.81±9.90 ab	391.01±15.74 b
Mg (mg kg^{-1})	297.22±70.54 a	213.15±35.89 ab	140.9±3.76 b	115.15±2.08 b
Cu (mg kg^{-1})	1.74±0.30 ab	1.07±0.15 b	2.31±0.60 a	1.04±0.30 b
Mn (mg kg^{-1})	4.76±0.49 a	8.47±2.25 a	7.92±1.17a	8.21±0.85 a
Zn (mg kg^{-1})	1.55±0.20 a	0.778±0.13 b	0.71±0.13 b	0.41±0.10 b
Fe (mg kg^{-1})	41.84±12.07 a	34.91±11.81 a	44.18±13.84 a	44.8±8.53 a
B (mg kg^{-1})	14.53±1.81 a	10.8±0.43 b	10.43±0.91 b	8.83±0.26 b
Na (mg kg^{-1})	30±15.28 a	10.67±1.76 a	7.33±0.67 a	8.67±2.40 a

Medias±EE con letras iguales por fila indican que no hay diferencias significativas ($p>0.05$). n=16.

En cuanto a las propiedades químicas del suelo, el pH, MO, CIC y CE presentaron valores significativamente mayores en el suelo del cv. Escarcha con manejo orgánico, respecto al cv. Rocío, bajo esta misma condición. El pH en todos los suelos fue más cercano a la neutralidad de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002). Fernández-Montes *et al.* (2010) refieren que un intervalo de pH entre 6.0 y 7.5 es óptimo para *P. persica*, debido a que favorece la absorción de nutrimentos y la productividad del cultivo. Respecto al contenido de materia orgánica, en el manejo orgánico del cv. Escarcha se obtuvo un valor significativo mayor (1.79%) (Cuadro 1), respecto al manejo inorgánico, tanto para los cultivares Escarcha y Rocío, siendo valores bajos de acuerdo con la NOM-021. García *et al.* (2020) reportaron 1.01% para la var. Escarcha con manejo orgánico, menor a lo obtenido en este trabajo. Hirzel (2017) refiere que un valor ideal de MO en el suelo para el cultivo del durazno debe ser de 1.5%. Esta propiedad es un indicador fundamental de la fertilidad edáfica, dado por su influencia en la retención de nutrimentos, disminución de la densidad aparente e incremento de la porosidad (Krüger *et al.*, 2018).

La conductividad eléctrica no alcanzó niveles que indiquen problemas de salinidad, no obstante, es importante mantener estos valores bajos, debido a que *P. persica* es una especie sensible a las concentraciones de sales (Fernández-Montes *et al.*, 2010). En cuanto a la CIC, se registró un valor mayor ($p < 0.05$) en el suelo bajo manejo orgánico con el cv. Escarcha, aunque se clasificó como baja (Semarnat, 2002). En suelos cultivados con durazno de las variedades Diamante y Oro México se reportó una CIC de 3.3 $Cmol^{(+)} \cdot kg^{-1}$ (Torres *et al.*, 2008), inferior a lo obtenido con el manejo orgánico y similar al inorgánico.

En relación con los nutrimentos, el manejo orgánico mostró un incremento significativo ($p < 0.05$) en el cv. Rocío en cuanto al N inorg, en cambio, el cv. Escarcha presentó valores significativos ($p < 0.05$) para Ca, Mg, Zn y B. Respecto al P y K no se tuvieron diferencias entre variedades por manejo, pero los valores son superiores de acuerdo a NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002). Lo que se puede atribuir a la mineralización progresiva de la materia orgánica, la cual actúa como fuente sostenida de nutrimentos (Monsalve *et al.*, 2017). Asimismo, el Mn, Fe y Zn no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre variedades por manejo, pero los valores se encuentran adecuados en base a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio confirman que, incluso en contextos de baja materia orgánica, el manejo orgánico contribuye de manera significativa a la conservación de las propiedades clave del suelo; tales como, el pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de nutrimentos esenciales. En consecuencia, se refuerza la necesidad de promover este tipo de manejo que priorice la fertilidad del suelo, como fundamento para incrementar la resiliencia y eficiencia de los sistemas frutícolas. En este sentido, el manejo orgánico se posiciona como una alternativa viable para mejorar la calidad del suelo y garantizar la productividad en regiones como Altzayanca, Tlaxcala.

BIBLIOGRAFÍA

Agustí, M. 2010. Fruticultura. Mundi-prensa. Madrid, España.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). The nature and properties of soils (15th ed.). Pearson Education.

Callejas-Rodríguez, R., Rojo-Torres, E., Benavidez-Zabala, C. & Kania-Kuhl, E. (2012). Crecimiento y distribución de raíces y su relación con el potencial productivo de parrales de vides de mesa. *Agrociencia*, 46(1), 23-35. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000100003&lng=es&tlng=es

Farias-Barreto, C., Vanni F.L., Navroski R., Feksa F.S., Flores C.R. & Vizzotto M. (2017). Nitrogen fertilization in peach trees (*Prunus persica* (L.) Batsch): Influence on post-harvest quality. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 18(2), 1-11.

Fernández-Montes, M. R., Pérez-González, S., Mondragón-Jacobo, C. (2010). Guía para cultivar duraznero en Tlaxcala. Centro de Investigación Regional Centro del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Folleto Técnico No.41. 33 pp.

García-Gallegos, E., Vázquez-Cuecuecha, O. G., Chávez-Gómez, J.A., Hernández-Acosta, E. & López-López, A. (2020). Relación entre parámetros edáficos y criterios de calidad poscosecha de frutos de *Prunus persica* (L.) Batsch mediante análisis multivariado. *Scientia Agropecuaria*, *11* (4), 565-573. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.04.12.

Hirzel, C. J. (2017). Fertilización en cultivo de duraznero. En: Zolezzi, V. M., Abarca, R. P. (Coord.). Manual de manejo del cultivo de duraznero. Boletín INIA No. 373. Instituto de Desarrollo Agropecuario. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile. Santiago, Chile. 104-113 pp.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). (2010). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Altzayanca, Tlaxcala. Ciudad de México, Ciudad de México, México: Clave geoestadística 29004. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/29/29004.pdf

Krüger, I., Chartin, C., van Wesemael, B. & Carnol M. (2018). Defining a reference system for biological indicators of agricultural soil quality in Wallonia, Belgium. *Ecological Indicators*, 95, 568-578.

Monsalve, C., Gutiérrez, J. S. & Andrés, W. (2017). Factores que intervienen en el proceso de mineralización de nitrógeno cuando son aplicadas enmiendas orgánicas al suelo. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 200-209. https://doi.org/10.17584/rcch.2017v11i1.5663

Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M.T., Landi, L., Pietramellara, G. & Renella, G. (2003). Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science*, 54 (4), 655–670. https://doi.org/10.1046/j.1351-0754.2003.0556.x

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2023). Cierre agrícola. Datos abiertos de producción de durazno. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). NOM-021-SEMARNAT-2000: Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/148153/NOM-021-SEMARNAT-2000.pdf

Servicio de información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2016). Durazno. https://www.tamaulipas.gob.mx/campo/wpcontent/uploads/sites/40/2019/09/durazno.pdf.

Torres, J. P., Cortés Flores, J.I., Turrent-Fernández, A., Hernández-Romero, E. & Muratalla, L.A. (2008). Rendimiento de fruto y número de ramas principales en árboles de durazno intercalados con milpa. *Terra Latinoamericana*, 26 (3), 265-273. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000300008&lng=es&tlng=es.

Zabaloy, M.C. (2021). Una sola salud: la salud del suelo y su vínculo con la salud humana. *Revista Argentina de Microbiología*, 53(4), 303-306. https://doi.org/10.1016/j.ram.2021.11.001.

MANGANESO EN PLANTAS PIONERAS DE SUELOS MINEROS EN NAOPA, HIDALGO, MÉXICO

Víctor Guzmán Castro[1]; Ramón Razo Zárate[1]; Otilio Arturo Acevedo Sandoval[1]; Rodrigo Rodríguez Laguna[1]; Juan Capulín Grande[1]; Miguel Ángel Rico Rodríguez[2]

[1] Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 43600, Tulancingo de Bravo, México
[2] Universidad Autónoma de Querétaro, 76010, Santiago de Querétaro, México

Correo del autor de correspondencia: gu215310@uaeh.edu.mx

RESUMEN

El estudio evaluó la acumulación de manganeso (Mn) en plantas pioneras colonizadoras de suelos mineros (SMI) en Naopa, Hidalgo, México. Se identificaron 11 especies vegetales pertenecientes a 7 familias, predominando las herbáceas, distribuidas de manera no uniforme en cinco sitios con altos niveles de Mn (hasta 12,929.75 mg kg^{-1}). Las plantas mostraron una acumulación preferencial de Mn en el orden hojas > raíces > tallos, sugiriendo mecanismos fisiológicos como la compartimentalización/detoxificación vacuolar. El factor de bioconcentración (BCF < 1 en todas las especies) descartó su utilidad para fitoextracción, mientras que especies como *Eragrostis mexicana* y *Panicum sp.* (factor de translocación TF < 1) demostraron potencial para fitoestabilización al retener Mn en raíces. Los resultados destacan la viabilidad de usar plantas exclusoras en el desarrollo de tecnologías de remediación sostenible para suelos en áreas mineras impactadas.

PALABRAS CLAVE: *Elementos potencialmente tóxicos; factor de bioconcentración; factor de translocación; fitoestabilización; fitorremediación.*

INTRODUCCIÓN

La actividad minera transforma irreversiblemente los suelos, concentrando elementos potencialmente tóxicos (EPT) como el manganeso (Mn) hasta niveles que comprometen la viabilidad de los sistemas biológicos (Zaynab *et al*., 2022; Antoniadis *et al*., 2017; Hudson-Edwards *et al*., 2011). Este fenómeno, documentado en regiones mineras de todo el mundo, reduce la capacidad productiva del suelo y genera riesgos ambientales persistentes (Gitari *et al*., 2018; Hudson-Edwards *et al*., 2011; Wang *et al*., 2008). En México, regiones con actividad minera histórica como Molango, Hidalgo, presentan suelos mineros (SMI) con niveles excepcionalmente altos de Mn (hasta 100,000 mg kg^{-1}) (Juárez-Santillán *et al*., 2010), los cuales demandan soluciones de remediación sostenibles. En este contexto, la fitorremediación, como tecnología basada en el uso de plantas para extraer o inmovilizar EPT (Pilon-Smits, 2005) se posiciona como una herramienta promisoria para la recuperación de SMI (Gitari *et al*., 2018; Juárez *et al*., 2010; Wang *et al*., 2008) Trabajos recientes han establecido que el factor de bioconcentración (BCF) y el factor de translocación (TF) son criterios fundamentales para la evaluación del potencial fitorremediador de las plantas (Pachura *et al*., 2017; Takarina y Pin, 2017). Sin embargo, en la región de Naopa, Hidalgo, la interacción entre SMI con altos niveles de Mn y plantas

pioneras no se ha caracterizado sistemáticamente, por lo cual, para abordar esta brecha, el objetivo de este trabajo es: i) identificar a las especies de plantas pioneras colonizadoras de SMI, ii) evaluar los patrones de distribución de Mn en sus tejidos (raíces tallos y hojas) y iii) clasificar dichas especies según su capacidad de acumulación de Mn mediante el BCF y el TF para la determinación de su potencial en la fitorremediación de SMI.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y muestreo. El área de estudio corresponde a la mina de Mn Unidad Naopa, ubicada en la localidad de Naopa, Hidalgo, México. El área corresponde a los suelos mineros y escombreras derivados de la explotación de Mn, con presencia natural de vegetación pionera. El muestreo se realizó en enero de 2024. En campo, se recolectaron tres muestras vegetales y dos botánicas de 11 especies observadas en cinco sitios de estudio (SMI-1 a SMI-5) seleccionados por la presencia de vegetación. Adicionalmente, en cada punto de muestreo vegetal se obtuvo una muestra simple de SMI a 30 cm de profundidad. Estas muestras simples se homogeneizaron mediante cuarteo (SEMARNAT, 2007) para obtener una muestra compuesta de SMI por sitio. Tanto las muestras vegetales como las de SMI se trasladaron al Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería (ICBI) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) para su pretratamiento y el análisis de Mn.

Pretratamiento y análisis de Mn. Las muestras vegetales fueron divididas en raíces, tallos y hojas, las cuales se lavaron con agua desionizada para eliminar contaminantes superficiales que pudieran interferir en el análisis de Mn. Posteriormente, cada tejido se secó en un horno Grieve LW201-C a una temperatura de 65 °C hasta alcanzar peso constante. Finalmente, el material seco de cada tejido se pulverizó utilizando un mortero eléctrico Retsch RM 200 hasta obtener un polvo de textura fina. Las muestras de SMI se secaron a la sombra a temperatura ambiente durante 24 h y posteriormente, se pulverizaron en un mortero de ágata hasta conformar un polvo fino. El proceso se realizó por triplicado para todas las muestras vegetales y de SMI. El análisis de Mn se realizó mediante la aplicación de los protocolos EPA 3052 (USEPA, 1994) para tejidos vegetales y EPA 3051A (USEPA, 1996) para los SMI, empleando un espectrofotómetro de emisión óptica Perkin Elmer Optima 8300. La validación instrumental incluyó una curva de calibración de 8 puntos con $r = 0.9996$ y $r^2 = 0.9992$.

Acumulación de Mn en plantas. Para evaluar la capacidad de acumulación y translocación de Mn en las plantas, se empleó el factor de bioconcentración (BCF) (Takarina y Pin, 2017) y el factor de translocación (TF) (Pachura *et al*., 2017), respectivamente. El BCF es igual a Mn RTH / Mn T_{SMI}, donde, Mn RTH es la sumatoria de la concentración de Mn en las raíces (Mn R_z), tallos (Mn T_a) y hojas (Mn H_s), y Mn T_{SMI} es la concentración de Mn en los SMI. El TF es igual a Mn TH / Mn R_z, donde, Mn TH es la sumatoria de Mn T_a y Mn H_s respecto a Mn R_z.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los SMI se caracterizaron por sus altos niveles de Mn, hasta 12929.75 mg kg^{-1} (SMI-5), 5420 mg kg^{-1} (SMI-4), 9828.92 mg kg^{-1} (SMI-3), 3120.38 mg kg^{-1} (SMI-2) y 1451.06 mg kg^{-1}

(SMI-1). Estos resultados son similares a los reportados por Wang *et al*. (2008) y Juárez *et al*. (2010) para suelos mineros y residuos de minas de Mn en Xiangtan, China, y Molango, México. No se reconoce ningún límite máximo permisible de Mn en SMI; sin embargo, Kabata-Pendias y Mukherjee (2007) han sugerido un umbral de advertencia de contaminación por Mn de entre 1,500 y 2,000 mg kg^{-1}. De acuerdo con este valor, SMI-2, SMI-3, SMI-4 y SMI-5 se encontrarían contaminados por Mn. Las 11 especies de plantas identificadas pertenecen a 7 familias distintas (Cuadro 1). Las plantas pioneras fueron mayoritariamente herbáceas. La vegetación no se distribuyó de manera uniforme en el área de estudio, observándose especies diferentes en cada sitio. En SMI-1 se encontró *Dryopteris sp*. y *Pteris longifolia* L. En SMI-2 se encontraron *Eragrostis mexicana* W., y *Wigandia caracasana* K. En SMI-3 se encontraron ejemplares de *Bauhinia pringlei* W., *Acacia farnesiana* L., *Desmodium psilophyllum* S., y *Pluchea odorata* C. En SMI-4 se encontró a *Bletia purpurea* Lam., y *Panicum sp*., mientras que en SMI-5 se encontró solo a *Leucaena esculenta* B. Respecto a la distribución de Mn en las plantas, los mayores niveles se encontraron en las hojas, con una media de 320.77 mg kg^{-1}. En los tallos y en las raíces se encontraron los niveles más bajos de Mn con una media de 88.18 mg kg^{-1}, 131.07 mg kg^{-1} respectivamente (Cuadro 1).

Cuadro 1. Plantas pioneras y acumulación de Mn.

Especie	***Familia***	***Hábito***	***Mn R_z Mn en mg kg^{-1}***	***Mn T_a***	***Mn H_s***	***Mn RTH***	***BCF***	***TF***
Dryopteris sp.	Dryopteridacea	Her	159.66 (± 1.22)	65.22 (± 1.56)	105.28 (± 2.98)	330.17	0.23	1.07
P. longifolia	Pteridaceae	Her	165.46 (± 9.57)	283.21 (± 6.40)	106.13 (± 8.33)	554.81	0.38	2.35
E. mexicana	Poaceae	Her	116.55 (± 3.76)	36.84 (± 0.68)	150.29 (± 5.27)	303.68	0.12	0.86
W. caracasana	Boraginaceae	Arb	14.09 (± 1.51)	31.60 (± 1.14)	308.02 (± 11.23)	353.71	0.11	21.40
B. pringlei	Fabaceae	Arb	61.97 (± 2.30)	70.46 (± 1.45)	593.03 (± 1.19)	725.46	0.07	10.70
A. farnesiana	Fabaceae	Ars	123.03 (± 2.28)	82.51 (± 2.72)	305.05 (± 13.06)	510.59	0.05	3.15
D. psilophyllum	Fabaceae	Her	68.54 (± 2.96)	77.43 (± 5.82)	226.73 (± 3.11)	367.22	0.03	4.63
P. odorata	Asteraceae	Arb	175.01 (± 3.81)	162.05 (± 6.49)	776.80 (± 29.33)	1106.49	0.11	5.37
B.. purpurea	Orchidaceae	Her	99.90 (± 5.02)	17.91 (± 1.61)	321.06 (± 12.52)	372.7	0.08	3.23
Panicum sp.	Poaceae	Her	353.10 (± 16.40)	54.67 (± 6.97)	249.80 (± 13.70)	657.57	0.12	0.86
L. esculenta	Fabaceae	Ars	105.11 (± 1.84)	122.04 (± 2.08)	299.63 (± 27.65)	526.78	0.04	4.01

Desviación estándar, n=3. Her = herbáceo, Ars = arbustivo, Arb = arbóreo.

Los resultados muestran una distribución desigual de Mn en los tejidos de las plantas siguiendo el orden hojas > raíces > tallos. Las elevadas concentraciones de Mn en hojas

coinciden con el rol del metal en la fotólisis del agua (Damián-Salinas *et al*., 2021; Millaleo *et al*., 2010) y la compartimentalización/detoxificación vacuolar (Pilon-Smits, 2005). Las concentraciones medias en raíces podrían estar relacionadas con la precipitación del Mn en la rizodermis (Millaleo *et al*., 2010) mientras que las bajas concentraciones en tallos sugieren una redistribución floemática limitada y escasos depósitos aplopásticos en tejidos vasculares (Pilon-Smits, 2005). El BCF varió entre 0.38 (*Drypteris sp*.) y 0.03 (*D. psilophyllum*). El rango del FCB sugiere limitaciones en la eficiencia de la absorción y acumulación de Mn en todas las especies. Los bajos valores del BCF en las 11 especies identificadas descartan su uso para la fitoextracción de Mn según el umbral (BCF > 1) establecido por Fitz y Wenzel (2002) y Takarina y Pin (2017). El TF varió entre 21.40 (*W. caracasana*) y 0.86 (*Panicum sp*.). Los altos valores del TF sugieren una predominancia de estrategias de acumulación foliar de Mn. Los estudios de Pachura *et al.* (2016) y Takarina y Pin (2017) destacan que las plantas exclusoras (TF < 1) como *E. mexicana* y *Panicum sp*., son ideales para su uso en fitoestabilización por su capacidad para inmovilizar EPT como el Mn en raíces, reduciendo su transferencia a tejidos aéreos y limitando su reincorporación en el sustrato por acumulación del litter.

CONCLUSIONES

Se identificaron 11 especies de plantas pertenecientes a 7 familias distintas. La distribución del Mn en las plantas fue preferencial en las hojas, con niveles medios en raíces y mínimos en tallos. Las plantas pioneras presentaron una capacidad limitada para la fitoextracción de Mn, evidenciada por un BCF < 1 en todas las especies. Se confirmó que especies como *E. mexicana* y *Panicum sp*., con TF < 1, son candidatas adecuadas para el desarrollo de tecnologías de fitoestabilización, al retener el Mn principalmente en sus raíces.

AGRADECIMIENTOS

A la secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el financiamiento que permitió el desarrollo de este trabajo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

Antoniadis V., Levizou E., Shaheen S.M., Ok Y.S., Sebastian A., Baum C. & Rinklebe J. (2017). Trace elements in the soil-plant interface: phytoavailability, translocation, and phytoremediation–a review. *Earth-Science Reviews,* 171 (1), 621-645. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.005.

Damián-Salinas, D., Rivera-Rodríguez, D.A., Lizárraga-Mendiola, L. & Vázquez-Rodríguez, G.A. (2022). Andanzas de un elemento mágico: el ciclo biogeoquímico del manganeso. En: CIERMMI Women in Science. T XVI: Biology, Chemistry and Life Sciences (pp. 39–58). *ECORFAN*. https://doi.org/10.35429/H.2021.14.39.58.

Fitz W.J. & Wenzel W.W. (2002). Arsenic transformation in the soil rhizosphere plant system, fundamentals and potential application of phytoremediation. *Journal of biotechnology*, 99(3), 259-278. https://doi.org/10.1016/S0168-1656(02)00218-3.

Gitari M.W., Akinyemi S.A., Ramugondo L., Matidza M. & Mhlongo S.E. (2018). Geochemical fractionation of metals and metalloids in tailings and appraisal of environmental pollution in the abandoned Musina Copper Mine, South Africa. *Environmental Geochemistry and Health,* 40(1), 2421–2439. https://doi.org/10.1007/s10653-018-0109-9.

Hudson-Edwards K.A., Jamieson H.E. & Lottermoser B.G. (2011). Mine wastes: past, present, future. *Elements,* 7(6), 375–379. https://doi.org/10.2113/gselements.7.6.375

Juárez-Santillán L.F., Lucho-Constantino C.A., Vázquez-Rodríguez G.A., Cerón-Ubilla N.M. & Beltrán-Hernández R.I. (2010). Manganese accumulation in plants of the mining zone of Hidalgo, Mexico. *Bioresource Technology*, 101(15), 5836–5841. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.03.020.

Kabata-Pendias A. & Mukherjee A.B. (2007). *Trace elements from soil to human*. Springer.

Millaleo R., Reyes-Díaz M., Ivanov A. G., Mora M. L. & Alberdi M. (2010). Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistant mechanisms. *Journal of science and plant nutrition,* 10(4), 470-481. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008.

Pachura P., Ociepa-Kubicka A. & Skowron-Grabowska B. (2016). Assessment of the availability of heavy metals to plants based on the translocation index and the bioaccumulation factor. *Desalination and Water Treatment,* 57(3), 1469-1477. https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1017330.

Pilon-Smits E. (2005). Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Biol,* 56(1), 15-39. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214.

SEMARNAT (2007). Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Secretaría de Salud. Diario Oficial de la Federación, México. 2 de marzo de 2007.

Takarina N.D. & Pin, T.G. (2017). Bioconcentration factor (BCF) and translocation factor (TF) of heavy metals in mangrove trees of Blanakan fish farm. *Makara journal of science,* 21(2), 77-81.

USEPA. (1994). *EPA Method 3051: Microwave assisted acid extraction of sediments, sludges, soils, and oils*. Office of Solid Waste and Emergency Response. United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C., EUA, 30 pp.

USEPA (1996). EPA Method 3052: Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. Office of Solid Waste. United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C., EUA, 14 pp.

Wang X., Liu Y., Zeng G., Chai L., Xiao X., Song X. & Min Z. (2008). Pedological characteristics of Mn mine tailings and metal accumulation by native plants. *Chemosphere,* 72(9), 0–1266. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.05.001.

Zaynab M., Al-Yahyai R., Ameen A., Sharif Y., Ali L., Fatima M., Nazir S., Ali N., Al-Yahyai S., Khan K. & Li S. (2022). Health and environmental effects of heavy metals. *Journal of King Saud University-Science,* 34(1), 101653. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101653

Zine H., Midhat L., Hakkou R., El Adnani M. & Ouhammou A. (2020). Guidelines for a phytomanagement plan by the phytostabilization of mining wastes. *Scientific African*, 10(1), 1-20. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00654.

SILICIO MITIGA EL IMPACTO DEL DÉFICIT HÍDRICO EN JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)

José Amilcar Morales López[1]; Víctor Manuel Ordaz Chaparro[1]; Sara Monzerrat Ramírez Olvera[1]; Olga Gómez Rodríguez[2]; Manuel Sandoval Villa[1]; Fernando Carlos Gómez Merino[3]

[1] Posgrado en Edafología, [2] Posgrado en Fitosanidad, [3] Posgrado en Fisiología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. km 36.5, Carr. México-Texcoco, Montecillo, 56264, Texcoco, Estado de México, México.

Correo del autor de correspondencia: ordaz@colpos.mx*

RESUMEN

El silicio (Si) es reconocido por su capacidad para mejorar la tolerancia de las plantas al estrés biótico y abiótico, incluido el déficit hídrico. En esta investigación se evaluó el efecto de tres concentraciones de Si (0, 1.5 y 3 mM), aplicadas vía drench, sobre el crecimiento vegetativo y la producción de frutos en plantas de jitomate (*Solanum lycopersicum* L., híbrido CID F1) cultivadas bajo condiciones de estrés hídrico inducido. El experimento se desarrolló en invernadero bajo un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. Se registraron las variables altura de planta, número de hojas y número de frutos hasta el quinto racimo. Los resultados mostraron que las concentraciones de 1.5 y 3 mM de Si promovieron un incremento significativo ($P \leq 0.05$) en la altura de planta y el número de hojas. No obstante, no se observaron diferencias significativas en el número de frutos entre tratamientos respecto al testigo. Estos hallazgos indican que el Si, bajo las condiciones evaluadas, actúa como un bioestimulante del crecimiento vegetativo sin incidir directamente en la productividad. Se concluye que la aplicación de Si puede ser una herramienta complementaria en el manejo agronómico del jitomate bajo estrés hídrico y podría contribuir al manejo sustentable del agua en la agricultura intensiva.

PALABRAS CLAVE: *Aplicación en drench; biomasa; bioestimulación; concentraciones silicio; estrés abiótico.*

INTRODUCCIÓN

El Si, es reconocido como un elemento multifuncional ampliamente distribuido en la corteza terrestre, ha demostrado efectos beneficiosos en numerosas especies vegetales, particularmente bajo condiciones de estrés biótico y abiótico. Su absorción por las raíces y posterior translocación a los tejidos aéreos le confiere la capacidad de actuar como un modulador ecológico versátil, mitigando el estrés en función de las demandas fisiológicas de la planta. Estudios recientes destacan su naturaleza multifacética, no solo como componente estructural, sino también como inductor de respuestas adaptativas que mejoran la tolerancia a factores de estrés abiótico (Souri *et al*., 2021; Trejo-Téllez *et al*., 2016).

El estrés por déficit hídrico ocurre cuando la transpiración supera la capacidad de absorción de agua por las raíces (Prospects, 2016), y representa una de las principales limitantes para la producción agrícola mundial, agravada por el cambio climático y la variabilidad en los patrones climáticos (Deshmukh *et al*., 2017).

El Si actúa como un modulador clave en la defensa de las plantas frente al estrés hídrico. Su efecto protector incluye la neutralización de especies reactivas de oxígeno (ERO), lo que mejora la resiliencia vegetal ante diversos tipos de estrés abiótico (Mostofa *et al*., 2021).

El jitomate (*S. lycopersicum* L.) es un cultivo hortícola de gran relevancia económica y nutricional a nivel global, con una producción mundial de 144.8 millones de toneladas en 2023 (FAOSTAT, 2023), donde México se posicionó como el séptimo productor (con 4.4 millones de toneladas) y el principal exportador, destacando estados como Sinaloa, Sonora, Jalisco, Guanajuato y Puebla (SIAP, 2024). Aunque es altamente sensible al estrés hídrico, el jitomate ha demostrado una notable plasticidad fenotípica y mecanismos de adaptación fisiológica que le permiten mantener rendimientos aceptables bajo diferentes regímenes de riego, mejorando la eficiencia en el uso del agua mediante un mayor aprovechamiento hídrico en la producción de biomasa frutal (Hernández-Espinoza y Barrios-Masias, 2020).

Frente a la disminución proyectada de recursos hídricos, se vuelve prioritario estudiar la respuesta ecofisiológica del jitomate bajo distintos regímenes de riego para diseñar estrategias de manejo sostenible (Hafshejani *et al*., 2022). En este contexto, la aplicación de Si se presenta como una alternativa prometedora para mejorar la resiliencia del cultivo al estrés hídrico. No obstante, su efectividad está modulada por factores como: método de aplicación, dosificación, etapa fenológica e intensidad del estrés (Shi *et al*., 2016).

En la presente investigación se evaluó el efecto de tres concentraciones de Si (0, 1.5 y 3 mM) aplicadas vía drench en la altura de planta, número de hojas y número de frutos en plantas de jitomate (*S. lycopersicum* L.) cultivadas bajo condiciones de déficit hídrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el invernadero del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, entre junio y diciembre de 2024. Se utilizaron plántulas de jitomate híbrido CID F1 (*S. lycopersicum* L.) de 33 días de edad, trasplantadas en bolsas con tezontle de 40 × 40 cm.

A los 13 días después del trasplante, se inició la aplicación de Si vía drench en concentraciones de 0 (testigo), 1.5 y 3 mM y acondicionó a las plantas para enfrentar condiciones de déficit hídrico. Las aplicaciones continuaron cada 14 días, utilizando como fuente metasilicato de sodio grado reactivo ($Na_2O_3Si.5H_2O$), disuelto en agua destilada. En el tratamiento testigo (0 mM), se asperjó exclusivamente agua destilada.

La nutrición se basó en la solución nutritiva universal de Steiner (1984). A partir de los 21 días después del trasplante, se redujo el suministro al 50% del volumen requerido, para inducir condiciones de déficit hídrico controlado.

Se evaluaron la altura de planta, número de hojas y número de frutos. Las mediciones se realizaron cada 14 días. Para la variable número de frutos, se contabilizaron hasta el

quinto racimo de cada unidad experimental. La medición de la altura se efectuó utilizando un flexómetro y calibrador vernier.

El diseño experimental empleado fue completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza, la comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), utilizando el software SAS Studio 9.4 (Copyright © 2025, SAS Institute).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de Si ejerció un efecto significativo ($P \leq 0.05$) sobre la altura de las plantas de jitomate en comparación con el testigo, este efecto fue dependiente del tiempo de evaluación. A los 14 días después del inicio de los tratamientos (ddit), no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos. A partir de los 28 ddit, se observó un incremento significativo en la altura de las plantas, siendo el tratamiento con 1.5 mM de Si el que registró los mayores valores. El tratamiento con 3 mM de Si también mostró efecto positivo en comparación con el testigo, aunque de menor magnitud que la concentración de 1.5 mM (Cuadro 1).

Cuadro 1. Altura de plantas de jitomate con aplicación de silicio vía drench en diferentes concentraciones.

Si (mM)	Altura de planta (cm) a lo largo de días después de iniciados los tratamientos (ddit)				
	14	28	42	56	70
0	45.75 ± 3.20 a	86.75 ± 5.90 c	119.00 ± 14.49 c	131.87 ± 19.30 c	143.95 ± 20.86 c
1.5	45.25 ± 3.86 a	100.75 ± 4.03 a	148.75 ± 7.22 a	171.50 ± 13.69 a	191.97 ± 16.93 a
3	45.50 ± 1.29 a	95.25 ± 5.25 b	135.00 ± 3.65 b	155.87 ± 2.95 b	169.67 ± 2.95 b

Medias ± DE con letras diferentes en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (n = 4). Análisis mediante estadística no paramétrica para medidas repetidas, con la prueba de Nemenyi para comparaciones múltiples.

El Si también influyó significativamente en el número de hojas, al incrementar la cantidad a partir de los 56 ddit (Cuadro 2). El tratamiento con aplicación de 1.5 mM de Si registró el mayor número de hojas respecto al testigo, seguido por el de 3 mM.

Cuadro 2. Número de hojas en plantas de jitomate con aplicación de silicio vía drench en diferentes concentraciones.

Si (mM)	Número de hojas a lo largo de días después de iniciados los tratamientos (ddit)				
	14	28	42	56	70
0	8.50 ± 0.57 a	12.25 ± 1.25 a	14.75 ± 1.50 a	16.50 ± 1.91 b	18.00 ± 1.83 b
1.5	9.00 ± 0.82 a	12.50 ± 1.00 a	15.50 ± 1.00 a	19.75 ± 0.96 a	22.25 ± 1.50 a
3	8.25 ± 0.50 a	12.00 ± 0.82 a	15.00 ± 0.82 a	17.50 ± 1.00 ab	20.25 ± 0.50 ab

Medias ± DE con letras diferentes en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$, n = 4).

La aplicación de Si no mostró diferencias significativas en el número de frutos con respecto al testigo (30.25 ± 5.85 a, 29.75 ± 3.09 a, 32.25 ± 4.12 a, para Si 0, 1.5 y 3 mM, en el

mismo orden), lo que indica que, bajo las condiciones experimentales evaluadas, no existe evidencia suficiente para afirmar que el Si actúe directamente en la inducción floral o en el cuajado de frutos en jitomate hasta el quinto racimo.

Los resultados indican que la aplicación de Si (1.5 y 3 mM) favoreció el incremento en la altura de las plantas a lo largo del ciclo del cultivo. No obstante, la ausencia de diferencias en el número de hojas en las primeras etapas (14–42 ddit) sugiere que el Si actúa principalmente sobre procesos fisiológicos secundarios, lo que respalda la hipótesis de que su efecto es más evidente en fases reproductivas, cuando la demanda energética de la planta es mayor (Zhang *et al*., 2019).

Por otra parte, el Si (1.5 mM) aplicado vía drench mejoró significativamente el crecimiento vegetativo (altura y número de hojas) en jitomate bajo déficit hídrico, coincidiendo con Mostofa *et al*. (2021), quienes atribuyen este efecto a la retención de agua y fortalecimiento de paredes celulares.

Los resultados también concuerdan con estudios que señalan al Si como fortalecedor de tejidos y estimulante de la división celular en cultivos hortícolas. La falta de efectos tempranos sugiere que su acción es acumulativa y depende del tiempo, debido probablemente a su absorción y translocación gradual, actuando como modulador tardío a través de su acumulación en los tejidos vegetales (Dou *et al*., 2023).

No se evidenció impacto en el número de frutos, lo que sugiere que el rol del Si es más relevante en tolerancia al estrés que en productividad directa. Este resultado contrasta con estudios, donde el Si incrementa la productividad. Una explicación plausible es que el híbrido de jitomate CID F1 posee una alta eficiencia reproductiva intrínseca, enmascarando posibles beneficios del Si. Alternativamente, factores como la polinización o el balance hormonal podrían ser limitantes, independientemente del aporte de Si (He *et al*., 2025; Reyes-Pérez *et al*., 2023).

La no diferencia en rendimiento contrasta también con Dou *et al*. (2023), quienes reportan aumento de frutos en tomate bajo estrés salino con Si. Esto podría deberse al diferente tipo de estrés, la variedad genética. La variedad de jitomate Cid F1 podría priorizar supervivencia sobre productividad (Reyes-Pérez *et al*., 2023).

CONCLUSIONES

La aplicación vía drench de Si en concentraciones de 1.5 y 3 mM generó efectos significativos ($P \leq 0.05$) sobre la altura y el número de hojas en *Solanum lycopersicum* L. (CID F1) mitigando el efecto del menor suministro de agua aplicado, promoviendo un crecimiento vegetativo diferencial respecto al testigo. Sin embargo, este estímulo no se tradujo en un incremento en la producción de frutos, lo que sugiere que el Si actúa principalmente como un bioestimulante del desarrollo vegetativo bajo estrés, lo que respalda su potencial como herramienta complementaria en el manejo agronómico de jitomate, aunque destaca la necesidad de integrar estrategias adicionales para optimizar simultáneamente la tolerancia al estrés y el rendimiento.

Estos resultados abren la posibilidad de realizar estudios complementarios que exploren otros métodos de aplicación, diferentes dosis y frecuencias, así como la

evaluación de variables fisiológicas y productivas adicionales que permitan comprender con mayor profundidad el papel del Si en la tolerancia al déficit hídrico en jitomate.

La integración de estrategias ecofisiológicas que incluyan el uso de bioestimulantes como el Si podría contribuir al manejo sustentable del agua en la agricultura intensiva.

BIBLIOGRAFÍA

Deshmukh, R. K., Ma, J. F. & Bélanger, R. R. (2017). Editorial: Role of silicon in plants. *Frontiers in Plant Science*, *8*(October), 1–3. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01858.

Dou, Z., Feng, H., Zhang, H., Abdelghany, A. E., Zhang, F., Li, Z. & Fan, J. (2023). Silicon application mitigated the adverse effects of salt stress and deficit irrigation on drip-irrigated greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*, *289*(August), 108526. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108526.

FAOSTAT. (2023). *Productos por país*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/faostat/es/#rankings/commodities_by_country.

Hafshejani, Z. B., Ghasemnezhad, M., Olfati, J., Khaledian, M. R. & Khalighi, A. (2022). the Influence of Silica Upon Quantitative, Qualitative, and Biochemical Traits of Tomato Under Water Stress. *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus*, *21*(5), 123–138. https://doi.org/10.24326/asphc.2022.5.11.

He, B., Wei, Y., Wang, Y., Zhong, Y., Fan, M., Gong, Q., Lu, S., Hassan, M. U. & Li, X. (2025). Silicon application improves tomato yield and nutritional quality. *BMC Plant Biology*, *25*(1). https://doi.org/10.1186/s12870-025-06249-8.

Hernández-Espinoza, L. H. & Barrios-Masias, F. H. (2020). Physiological and anatomical changes in tomato roots in response to low water stress. *Scientia Horticulturae*, *265*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109208.

Mostofa, M. G., Rahman, M. M., Ansary, M. M. U., Keya, S. S., Abdelrahman, M., Miah, M. G. & Phan Tran, L.-S. (2021). Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants. *Critical Reviews in Biotechnology*, *41*(6), 918–934. https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1892582

Prospects, F. (2016). Silicon in Plants. In *Silicon in Plants*. https://doi.org/10.1201/9781315369310

Reyes-Pérez, J. J., Tipán-Torres, H. C., Llerena-Ramos, L. T., Hernandez-Montiel, L. G. & Rivas-Garcia, T. (2023). Silicon increased the growth, productivity, and nutraceutical quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *51*(2), 1–13. https://doi.org/10.15835/nbha51213155.

Secretaría de Economía. (2024). *Intercambio comercial de México. Tomates frescos o refrigerados.* https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/tomatoes-fresh-or-chilled?redirect=true#:~:text=Los principales orígenes comerciales de,Marruecos (US$1%2C276M).

Shi, Y., Zhang, Y., Han, W., Feng, R., Hu, Y., Guo, J. & Gong, H. (2016). Silicon enhances water stress tolerance by improving root hydraulic conductance in *Solanum lycopersicum* L. *Frontiers in Plant Science*, *7*(FEB2016), 1–15. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00196.

SIAP. (2024). *Anuario* Estadístico de la Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/.

Souri, Z., Khanna, K., Karimi, N. & Ahmad, P. (2021). Silicon and Plants: Current Knowledge and Future Prospects. *Journal of Plant Growth Regulation*, *40*(3), 906–925. https://doi.org/10.1007/s00344-020-10172-7.

Trejo-Tellez, L., Gómez-Merino, F.C. & Alcántar-González, G. . (2016). Elementos benéficos: potencialidades y limitantes. In L. . Trejo-Tellez, F.C. Gómez Merino, & G. . Alcántar-González (Eds.), *Nutrición de cultivos* (Segunda ed, pp. 59–101).

Zhang, Y., Liang, Y., Zhao, X., Jin, X., Hou, L., Shi, Y. & Ahammed, G. J. (2019). Silicon compensates phosphorus deficit-induced growth inhibition by improving photosynthetic capacity, antioxidant potential, and nutrient homeostasis in tomato. *Agronomy*, 9(11), 1–16. https://doi.org/10.3390/agronomy9110733.

EFECTOS TEMPRANOS DEL PASTOREO NO SELECTIVO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN MADERAS DEL CARMEN (2022–2024)

Karla Liliana López García[1]; René Juárez Altamirano; Francisco Torralba González[2]; Yanet Hernández Gaspar[2]; Dulce Flores Rentería[3]

[1] Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Cinvestav Saltillo. Posgrado en Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía.
[2] Área de Protección de Flora y Fauna Maderas del Carmen, CONANP
[3] Secihti-Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Cinvestav Saltillo. Posgrado en Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía.

Correo del autor de correspondencia: karla.lopez@cinvestav.mx

RESUMEN

El suelo es la base de los ecosistemas y cumple con las funciones esenciales para la humanidad. No obstante, el cambio climático y las actividades humanas han acelerado su degradación. La gestión del pastoreo puede incidir directamente en la salud del suelo. El pastoreo rotacional de alta densidad, y en particular el pastoreo no selectivo, ha mostrado potencial para incrementar el contenido de carbono orgánico, mejorar la estructura y favorecer la recuperación de los pastizales. Este estudio evaluó el efecto del pastoreo no selectivo en propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo en cuatro sitios del Área de Protección de Flora y Fauna Maderas del Carmen (Coahuila, México), en fases iniciales de manejo regenerativo. Se midieron variables como respiración del suelo, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, densidad aparente y carbono de biomasa microbiana. El análisis de componentes principales permitió identificar patrones asociados al manejo y a las condiciones de cada sitio. A dos años de implementación, se observaron incrementos en la conductividad eléctrica y el pH. Los resultados confirman que el pastoreo no selectivo, complementado con periodos de descanso y adaptado a la variabilidad climática, puede contribuir a restaurar la funcionalidad del suelo en ecosistemas semiáridos.

PALABRAS CLAVE: *Componentes principales; salud del suelo; propiedades químicas; zonas semiáridas.*

INTRODUCCIÓN

El suelo cumple con múltiples funciones que sustentan la vida en la Tierra, algunas de ellas son: el almacenamiento de C, reciclaje de nutrientes, producción de materias primas y alimentos, entre otras. Sin embargo, como consecuencia del cambio climático y las actividades humanas, los suelos se están degradando, lo que conlleva la pérdida progresiva de sus funciones (Pereira *et al.,* 2018). Una de las actividades que más influyen en la degradación del suelo es la ganadería. A menudo, los pastizales se utilizan para alimentar al ganado dentro de sistemas establecidos. Existen diversas estrategias de manejo del pastoreo, clasificadas principalmente por el tiempo que los animales

permanecen en un área. Entre ellas, sobresalen el pastoreo continuo y el rotacional de alta densidad (Khatri-Chhetri *et al.,* 2024). Este último consiste en subdividir el terreno en varios potreros, concentrar temporalmente una alta carga animal en cada uno y trasladar el ganado al concluir el pastoreo; posteriormente, las áreas utilizadas se dejan en descanso, cuyo periodo se ajusta al régimen de lluvias (Khatri-Chhetri *et al.,* 2024). Además, se ha demostrado que el pastoreo rotacional con altas densidades puede incrementar el contenido de C orgánico del suelo, relacionado directamente con su capacidad de almacenamiento de C (Khatri-Chhetri *et al.*, 2024). La degradación de los pastizales se refleja en cambios en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, como la reducción de la materia orgánica, el aumento de la densidad aparente del suelo y la reducción de la retención de agua, entre otras (Zigangirova *et al.,* 2025). Por lo cual, es necesario evaluar cómo los sistemas de pastoreo influyen en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Para el presente estudio se evaluaron las variables de respiración del suelo (Rs), materia orgánica del suelo (MOS), pH, conductividad eléctrica (CE), densidad aparente (DA), carbono de la biomasa microbiana (CBM), humedad relativa (Hr), humedad del suelo (Ha), temperatura del suelo (Ts) y temperatura ambiental (Ta). Mediante un análisis de componentes principales se integraron dichas variables para identificar patrones. El objetivo fue evaluar el efecto del pastoreo no selectivo en suelos bajo manejo regenerativo en el Área de Protección de Flora y Fauna Maderas del Carmen, con el fin de valorar su viabilidad como estrategia para mejorar la salud del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron cuatro sitios de estudio dentro del Área de Protección de Flora y Fauna Maderas del Carmen, ubicada en la región noreste de Coahuila de Zaragoza, abarcando parcialmente los municipios de Múzquiz, Acuña y Ocampo. Los tipos de suelo que predominan en estos sitios son Leptosol y Calcisol. Los sitios corresponden a ejidos en fases iniciales de implementación del manejo regenerativo con pastoreo no selectivo. Los ejidos Salada Norte y Salada Sur comenzaron la implementación del pastoreo no selectivo en 2022; durante los dos años posteriores, y durante el muestreo, estas parcelas permanecieron en descanso debido a condiciones climáticas asociadas a sequías. Los ejidos San Francisco Agua de San Pedro y San Francisco Agua de los Fresnos también iniciaron el pastoreo no selectivo en 2022, permaneciendo sin pastoreo durante un año, y en 2024 se realizó su primer pastoreo. El muestreo se realizó en parcelas de 200 × 200 m, estableciendo cinco puntos siguiendo un diseño radial extrayendo muestras de suelo a una profundidad de 15 cm. En cada punto se registró la Ts, Ta y Hr relativa. Se retiró previamente la capa de hojarasca y se cuantificó la Rs mediante el analizador de gases infrarrojo portátil EGM-5 con cámara dinámica SRC-2. Se recolectaron aproximadamente 500 g de suelo, que posteriormente fueron trasladados al laboratorio. Allí, las muestras se pasaron por un tamiz de 2 mm de diámetro. El pH se determinó en una suspensión suelo:agua (1:2) y, con la misma mezcla, se midió la CE (NOM-021-SEMARNAT-2000). La DA se estimó mediante el método de la probeta utilizando un volumen conocido de agua. El contenido de MOS se calculó por calcinación a 450 °C (Salehi *et al.*, 2011). Los

datos se analizaron mediante un análisis de componentes principales, realizado con el software Statistica, Statsoft 10v.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La ordenación de las variables físicas, químicas, biológicas y ambientales, realizada mediante el análisis de componentes principales, mostró que los dos primeros componentes explicaron el 55.6% de la variabilidad observada en los datos (Figura 1). El ejido La Salada Norte (triángulo azul) se ubica hacia valores positivos del segundo componente (C2) y cercanos a la DA, lo cual indica que este sitio presenta mayor compactación del suelo. Esta condición podría estar asociada al manejo local y al uso histórico previo a la implementación del manejo regenerativo. Los ejidos San Pedro (cuadro morado) y Los Fresnos (triángulo rojo) se posicionan en la parte central e inferior del plano, cercanos a pH y a valores bajos de MOS, lo que sugiere una menor mejora en propiedades químicas y biológicas durante los primeros dos años de manejo. Estos sitios podrían estar respondiendo más lentamente a los descansos, o bien reflejar condiciones iniciales más degradadas. Por otra parte, el ejido La Salada Sur (triángulo verde) se asocia al CBM y a una menor densidad aparente, lo cual indica un proceso de recuperación biológica y estructural inicial. Por otro lado, a dos años de la implementación del pastoreo no selectivo se registraron cambios significativos en diversas propiedades del suelo. El PCA mostró que, al inicio de la implementación del pastoreo no selectivo, el sistema se asoció principalmente con Ts y HR, lo que refleja una mayor influencia de las condiciones climáticas.

En contraste, tras dos años de aplicación, el suelo se relacionó con CE y pH, variables agrupadas en el primer componente (C1). Esta transición sugiere modificaciones en la estructura y en la química superficial del suelo, derivadas de la alteración de la cobertura vegetal, el pisoteo del ganado y la redistribución de nutrientes. En menor medida, también se evidenciaron cambios en CBM y MOS, lo que indica que los efectos del pastoreo no selectivo comienzan a manifestarse en la fracción biológica y orgánica del suelo. Estos resultados sugieren que la aplicación de descansos mediante pastoreo no selectivo generó mejoras simultáneas en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, reforzando su viabilidad como estrategia de manejo regenerativo en ecosistemas semiáridos. De manera consistente, diversos estudios señalan que los periodos adecuados de descanso favorecen la regeneración de los pastizales, incrementando la MOS y el CBM, lo que fortalece la resiliencia del suelo frente a eventos climáticos extremos (Apfelbaum *et al., 2022; Mosier et al., 2021)*. Las asociaciones encontradas en este estudio son los primeros indicadores de recuperación; sin embargo, se requiere un seguimiento a largo plazo para confirmar las tendencias observadas.

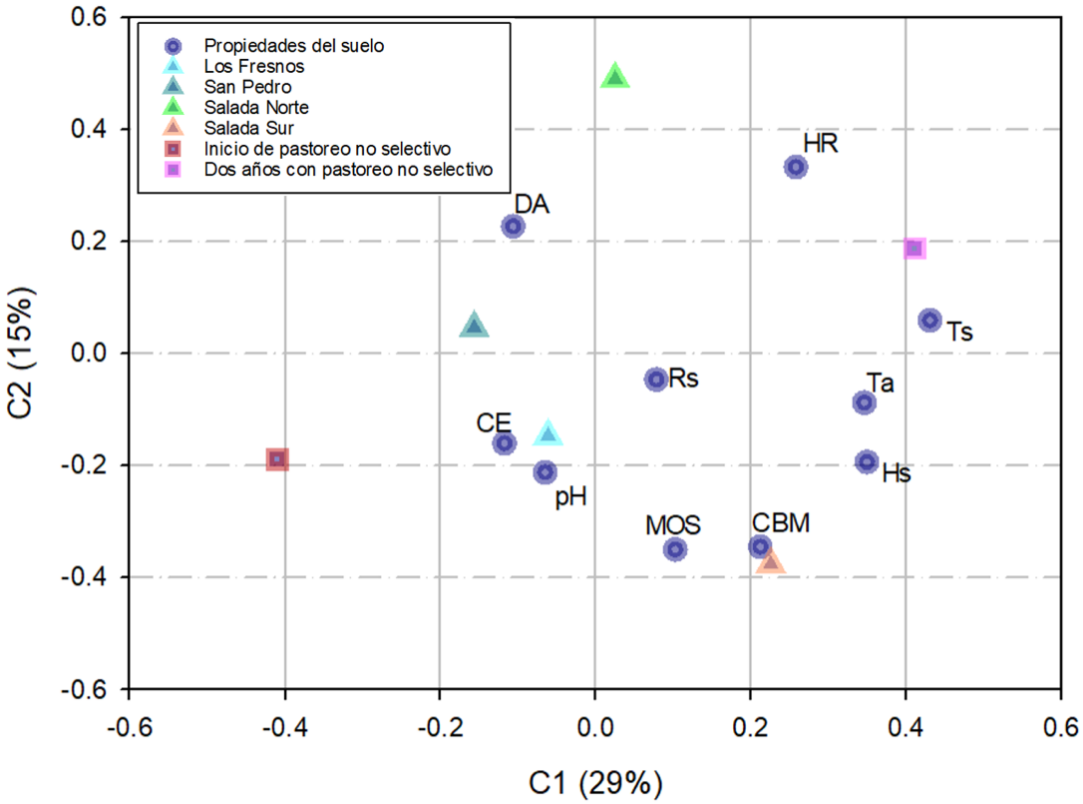


Figura 1. Análisis de componentes principales de las características físicas, químicas y biológicas de sitios que están en las primeras etapas de implementación del pastoreo no selectivo.

Los triángulos de color representan los sitios y los círculos los años de muestreo. Hs= humedad del suelo, DA= densidad aparente, Hr= humedad relativa, CBM= C de la biomasa microbiana, Rs= respiración del suelo, CE= conductividad eléctrica, MOS= materia orgánica del suelo, HR= humedad relativa, Ts= temperatura del suelo y Ta= temperatura ambiental.

CONCLUSIONES

La implementación del pastoreo no selectivo en el Área Natural Protegida de Flora y Fauna de Maderas del Carmen asoció variables clave de la salud del suelo, como la conductividad eléctrica y el pH en un periodo de dos años, mostrando su potencial para mantener las funciones del suelo en zonas semiáridas. La efectividad del pastoreo estuvo modulada por la variabilidad climática interanual y las condiciones específicas de cada sitio. Estos resultados sugieren que, para maximizar los beneficios del pastoreo no selectivo, es necesario combinar prácticas adaptativas con monitoreo continuo de las variables del suelo, considerando las condiciones climáticas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo para el desarrollo del proyecto al laboratorio de análisis químicos del Cinvestav. Agradecemos las facilidades prestadas por la CONAP y a la Reserva Natural Maderas del Carmen para realizar el muestreo en campo.

BILIOGRAFÍA

Apfelbaum, S.I., Thompson, R., Wang, F., Mosier, S., Teague, R. & Byck, P. (2022). Vegetation, water infiltration, and soil carbon response to Adaptive Multi-Paddock and Conventional grazing in Southeastern USA ranches. *Journal of Environmental Management,* 308, 114576.

Khatri-Chhetri, U., Banerjee, S., Thompson, K.A., Quideau, S.A., Boyce, M. S., Bork, E.W. & Carlyle, C.N. (2024). Cattle grazing management affects soil microbial diversity and community network complexity in the Northern Great Plains. *Science of The Total Environment,* 912, 169353.

Khatri-Chhetri, U., Thompson, K. A., Quideau, S.A., Boyce, M.S., Chang, S.X., Bork, E.W. & Carlyle, C.N. (2024). Adaptive multi-paddock grazing increases mineral associated soil carbon in Northern grasslands. *Agriculture, Ecosystems & Environment,* 369, 109000.

Mosier, S., Apfelbaum, S., Byck, P., Calderon, F., Teague, R., Thompson, R. & Cotrufo, M. F. (2021). Adaptive multi-paddock grazing enhances soil carbon and nitrogen stocks and stabilization through mineral association in southeastern U.S. grazing lands. *Journal of Environmental Management,* 288, 112409.

NOM-021-SEMARNAT-2000. Norma Oficial Mexicana número 021 de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Pereira, P., Bogunovic, I., Muñoz-Rojas, M. & Brevik, E. C. (2018). Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science & Health,* 5, 7-13.

Salehi, M., Beni, O. H., Harchegani, H. B., Borujeni, I. E. & Motaghian, H. J. P. (2011). Refining soil organic matter determination by loss-on-ignition. Pedosphere, 21(4), 473-482.

Zigangirova, R., Yurova, A. & Wu, Q. (2025). How Do Soil Temperature and Moisture Respond to the Impact of Grazing? A Modeling Analysis for the Qinghai Alpine Grassland Ecosystems. Environmental Modeling & Assessment.

RESPUESTA FISIOLÓGICA Y BIOQUÍMICA DEL AGUACATE A DIFERENTES ESQUEMAS DE NUTRICIÓN VEGETAL

Víctor Manuel Montoya Jasso[1]; Jesús Manuel Arreola Tostado[2]; Jesús Manuel Arreola Nava[2]; Ana Luisa González Serrano[3]

[1] Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco. 56264. Estado de México, México.
[2] Consultor agrícola. Calle Apaseo el Grande 114, Colonia Guanajuato, Celaya. 38010. Guanajuato, México.
[3] Universidad de Guanajuato. Campus Irapuato-Salamanca. Carretera Irapuato-Silao km 9.0, 311, Ex Hacienda El Copal, Irapuato. 36500. Guanajuato, México.

Correo del autor de correspondencia: montoya.victor@copos.mx

RESUMEN

El aguacate es una fruta apreciada desde épocas prehispánicas por su sabor, consistencia y propiedades alimenticias. Recientemente, se desarrolla como un cultivo de alta demanda y derrama económica, no obstante, los sitios de mayor producción presentan problemas en la calidad del fruto. El objetivo fue evaluar la respuesta de diferentes fuentes de nutrición vegetal sobre la calidad y rendimiento del cultivo de aguacate. El estudio se llevó a cabo en Salvatierra, Guanajuato, durante los años 2023/2024. Se evaluaron dos fuentes de fertilización: 1) orgánica y 2) sintética, ambas se ajustaron a un aporte de 450, 300 y 450 kg ha^{-1} de N-P-K; respectivamente. Se definieron tres tratamientos distribuidos en un testigo absoluto sin fertilización, un testigo con fertilización sintética y un tratamiento de fertilización orgánica. Los tratamientos se distribuyeron aleatoriamente en un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones. Los resultados mostraron que la nutrición orgánica promovió un mayor número de frutos por árbol con calibre superior, por consiguiente, un rendimiento medio anual de 16.87 t ha^{-1}; un tonelaje superior en comparación con el tratamiento sintético que obtuvo un rendimiento medio anual de 13.49 t ha^{-1}. Sobresale el efecto en el perfil de ácidos grasos, donde el tratamiento orgánico fue superior en el contenido de ácido oleico y linoleico respecto al resto de tratamientos. El tratamiento absoluto mostró un mayor contenido de ácido palmítico. La nutrición orgánica elevó el rendimiento medio del fruto, asimismo potencializó las características nutracéuticas del aguacate al presentar estabilidad superior en el contenido de omegas 6 y 9.

PALABRAS CLAVE: *Ácidos grasos; nutrición orgánica; rendimiento agrícola.*

INTRODUCCIÓN

El aguacate es un cultivo representativo en América, donde el mercado mexicano es el mayor productor a nivel mundial; en el año 2020 produjo cerca de 2.4 millones de toneladas, representando el 43% de la producción mundial (Cruz-López *et al*., 2022). El aguacate es una fruta reconocida por el efecto que tiene en el bienestar derivado de un perfil nutricional rico en lípidos grasos, proteínas, carbohidratos y fibra dietética (Salazar-

López *et al.*, 2020; Hiti-Bandaralage *et al*., 2017) que ha impulsado la generación de estrategias de manejo competitivas en la agricultura, centradas en la obtención de cultivos más saludables.

Entre las técnicas se encuentra el empleo de insumos con un menor grado de residualidad tanto en fruto como en suelo y planta. Actualmente, existe un auge en el uso de insumos agrícolas bajo el tema orgánico que cumplen con parámetros de inocuidad, composición elemental garantizada y efectividad en la nutrición de cultivos, por mencionar algunas cualidades. Comparados con la fertilización sintética convencional, la nutrición orgánica ofrece ventajas como una mejor disponibilidad y estabilidad de nutrientes que potencializan la absorción por la planta, traduciéndose en mayores rendimientos, sanidad, calidad postcosecha, calidad organoléptica, etc. (Thomya *et al.*, 2025). Es por ello que el objetivo fue evaluar la respuesta de diferentes fuentes de nutrición vegetal sobre la calidad y rendimiento del cultivo de aguacate.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en predios bajo producción de aguacate Hass en la comunidad Maravatío del Encinal, Salvatierra, Guanajuato, México durante dos ciclos agrícolas (2023/2024); el sitio cuenta con condiciones climáticas como una temperatura media anual de 18.4 °C y una precipitación anual acumulada de 726 mm (Servicio Meteorológico Nacional, 2025); el suelo se clasificó como Phaeozem. Se emplearon tres tratamientos: 1) testigo absoluto con nula aplicación de fertilización, dos fuentes de fertilización: 2) orgánica, definida por un biofertilizante a base de mosto de caña de azúcar y, 3) sintética, integrada por aportes de nitrato de calcio, fosfato diamónico y cloruro de potasio; ambas fuentes fueron dosificadas en cuatro aplicaciones anuales dirigidas al suelo hasta contar con un suministro total de 450, 300 y 450 kg ha^{-1} de N-P-K; respectivamente. Las variables que se midieron fueron el número y calibre de frutos comercializables, rendimiento y se caracterizó el perfil de ácidos grasos de la pulpa (palmítico, oleico y linoleico) (AOAC, 2000). El diseño experimental aplicado correspondió a un bloque al azar; cada tratamiento contó con cuatro repeticiones, cada una integrada por 15 árboles para contar con 180 individuos como unidades experimentales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros fisiológicos. El cultivo de aguacate presenta una alternancia en la producción, caracterizada por variaciones en la intensidad de floración entre ciclos de producción (Franco *et al*., 2018), siendo la disponibilidad de nutrientes uno de los factores que regulan la alternancia, sumado a bajas temperaturas y estrés hídrico (Williams *et al.*, 2017).

Lo anterior explica el número de frutos con potencial comercialización para exportación que se produjeron por árbol, los cuales obtuvieron diferencias estadísticas significativas, siendo de 40 frutos en el tratamiento absoluto, 72 en el tratamiento sintético y 77 en el tratamiento orgánico (Figura 1). Dichos frutos fueron catalogados como calibre 60-70 en el tratamiento absoluto, lo que indica frutos de menor tamaño destinados para

comercialización a granel. Los frutos obtenidos en los tratamientos sintéticos y orgánico obtuvieron un calibre 40-48, siendo frutos aptos para exportación gracias a la uniformidad entre calidad y tamaño.

Franco *et al*. (2018) mencionan que el aguacate presenta rendimientos contrastantes entre cortes, siendo mayor el obtenido en el primer corte y reduciendo en los subsecuentes, propiciados por el periodo de floración en verano e invierno, los cuales requieren entre 10 y 8 meses para alcanzar la madurez fisiológica. Es de suma importancia, ya que ello define el rendimiento medio anual, sumado al manejo agronómico. La variable de rendimiento presentó diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, siendo el tratamiento absoluto el que obtuvo el menor rendimiento medio con 5.85 t ha^{-1}, mientras el tratamiento orgánico obtuvo un rendimiento medio de 16.87 t ha^{-1}; 3.38 t ha^{-1} más que el tratamiento bajo fertilización sintética (Figura 1). Lo que, de acuerdo con Montoya-Jasso *et al*. (2021), es respuesta a la presencia de nutrientes con una mayor disponibilidad para absorción por las plantas, siendo una de las principales características de los insumos para nutrición orgánica (González-Contreras *et al*., 2023).

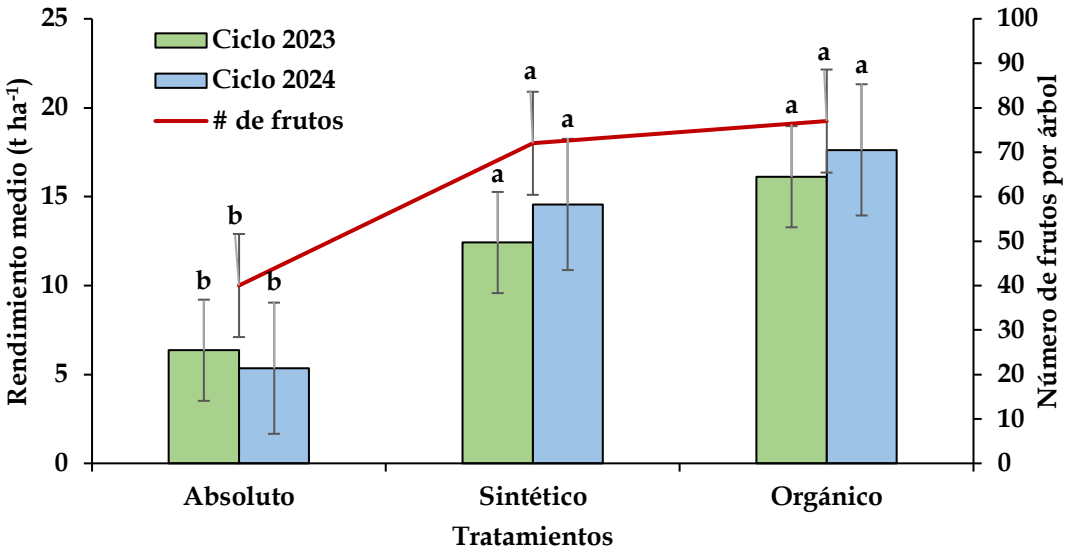


Figura 1. Rendimientos medios anuales, y número de frutos por árbol de aguacate.

*Letras diferentes entre tratamientos indican significancia estadística ($p \leq 0.05$).

Perfil de ácidos grasos. Una de las principales cualidades del aguacate es su contenido de omegas en su pulpa. Los resultados ofrecen una perspectiva interesante, ya que, cuando se suprimió totalmente la nutrición del cultivo, la concentración de ácido palmítico incrementó hasta un 23% comparado con la presencia de fertilización sintética y 39% respecto a la fertilización orgánica. Un efecto contrario se observó con el ácido oleico (omega 6), el manejo orgánico obtuvo una concentración de 62.5 g por cada 100 g de aceite total en pulpa, siendo 10% mayor respecto a la fertilización sintética y 18% superior al tratamiento absoluto. El manejo orgánico presentó una concentración de ácido linoleico (omega 9) de 22.3 g por cada 100 g de aceite total en pulpa, seguido por el

tratamiento absoluto con 20.9 g por cada 100 g de aceite, el tratamiento sintético mostró la menor concentración con 16 g por cada 100 g de aceite (Figura 2).

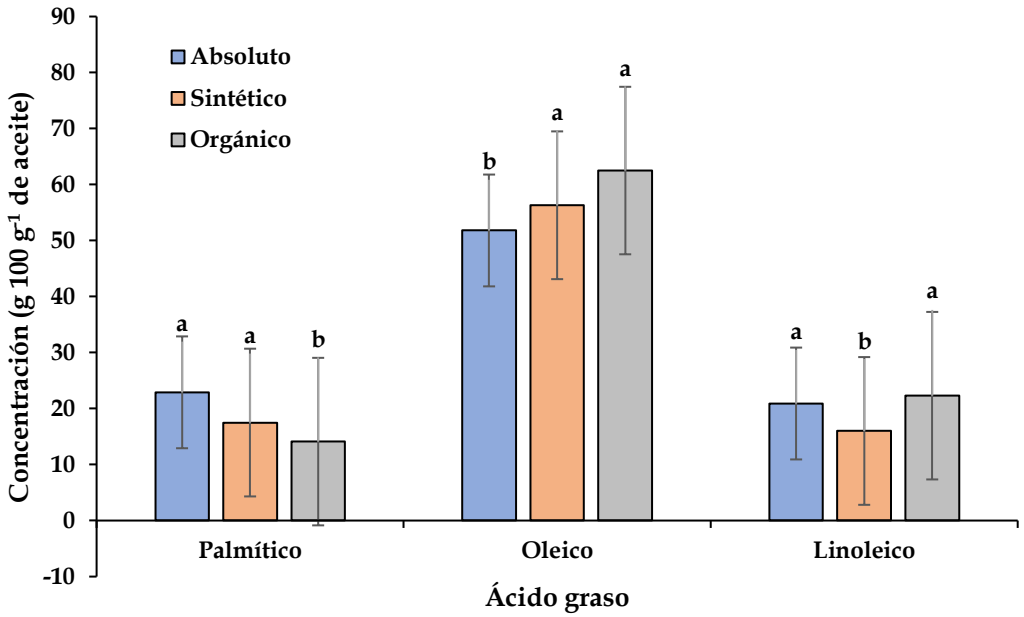


Figura 2. Concentración de ácidos grasos en la pulpa de aguacate.

*Letras diferentes entre tratamientos indican significancia estadística ($p \leq 0.05$).

El consumo de omega 6 y 9 es importante para el cuidado de la salud humana tras su consumo (Rodríguez *et al.*, 2019). Entre el contenido de grasas se incluye el ácido palmítico, el cual tiene efectos negativos por su consumo prolongado al ser un tipo de grasa saturada, Salazar-García *et al.* (2019) recomiendan consumir el fruto dos semanas después de su fecha de corte ya que su concentración se reduce hasta en un 31%. Los ácidos linoleico y oleico son todo lo contrario, ambos presentan efectos benéficos tras su consumo como apoyo en la reducción de enfermedades cardiovasculares.

CONCLUSIONES

El manejo del cultivo de aguacate con el biofertilizante de caña de azúcar incrementó el rendimiento de fruto potencialmente comercial para exportación en un 20%, respecto a la nutrición sintética convencional.

Los frutos obtenidos bajo un manejo orgánico presentaron un perfil de ácidos grasos con mayor concentración de omegas 6 y 9, lo que elevó su calidad nutricional para consumo.

BIBLIOGRAFÍA

AOAC. (2000). Official methods of analysis of the Association of Analytical Chemists International. 17ª ed. Gaithersburg, USA. Hoerwitz W. Ed.

Cruz-López, D. F., Caamal.Cauich, I., Pat-Fernández, V. G. & Reza-Salgado, J. (2022). Competitividad de las exportaciones de aguacate Hass de México en el mercado mundial. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 13(2): 355-62. https://doi.org/10.29312/remexca.v13i2.2885.

Franco, S. M. A.; Leos, R. J. A.; Salas, G. J. M.; Acosta, R. M. & García, M. A. (2018). Análisis de costos y competitividad en la producción de aguacate en Michoacán, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc*. 9(2):391-403. https://doi.org/10.29312/remexca.v9i2.1080.

Gonzalez-Contreras, Y., Cisneros-López, H. C., Montoya-Jasso, V. M., Cervantes-Ortiz, F. & Arreola-Tostado, J. M. (2023). Rendimiento, calidad física e índices de cosecha nutrimental de grano de maíz como respuesta a la aplicación de fertilización sintética y orgánica. *Suelos Ecuatoriales*. 53(1 y 2): 1-11. https://doi.org/10.47864/SE(53)2023p1-11_168.

Hiti-Bandaralage, J. C. A., Hayward, A. & Mitter, N. (2017). Micropropagation of Avocado (*Persea Americana* Mill.). *American Journal of Plant Sciences*, 8(11): 811197. https://doi.org/10.4236/ajps.2017.811197.

Montoya-Jasso, V. M., Ordaz-Chaparro, V. M., Benedicto-Valdés, G. S., Ruiz-Bello, A. & Arreola-Tostado, J. M. (2021). Caracterización química y física de sustratos enriquecidos con minerales y composta. *Terra Latinoamericana*, 39: 1-10. e601. https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.601.

Rodríguez, I., Cámara-Martos F., Flores J. M. & Serrano S. (2019). Spanish avocado (*Persea americana* Mill.) honey: Authentication based on its composition criteria, mineral content and sensory attributes. *Food Science and Technology*. 111, 561-572. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.068.

Salazar-García, S., Ibarra-Estrada, M. E. & González-Valdivia, J. (2018). Fenología del aguacate "Méndez" en el sur de Jalisco, México. *Agrociencia,* 52(7): 991-1003.

Salazar-López, N. J., Domínguez-Avila, J. A., Yahia, E. M., Belmonte-Herrera, B. H., Wall-Medrado, A., Montalvo-González, E. & González-Aguilar, G. A. (2020). Avocado fruit and by-products as potential sources of bioactive compounds. *Food Research International,* 138: 109774. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109774

Servicio Meteorológico Nacional. (2025). Información estadística climatológica. Estación Salvatierra-11060. Obtenido de: https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica.

Thomya, S., Tangpao, T., Hsiao-Hang, Ch., Bekker, M. Z., Rachtanapun, P., Phimolsiripol, Y., Sommano, S. R. & Wongkaew, M. (2025). Ripening and thermal processing effects on avocado pulp product: A novel approach to physicochemical, fatty acid, and bitterness transformations. *Food Research International*, 225: 117926. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117926.

Williams, G. W.; Capps, O. and Hanselka, D. (2017). The national economic benefits of food imports: The case of U.S. Imports of Hass avocados from Mexico. *J. Int. Food Agribus. Mark*, 29(2):139–157. https://doi.org/10.1080/08974438.2016.1266570.

COMPOSICIÓN PROXIMAL Y COMPUESTOS BIOACTIVOS EN FLORES DE DALIA CV YARETZI BIOFORTIFICADAS CON ZINC

Orlanda Tanahiri García Gonzalez[1]; María Teresa Martínez Damián[2]; Oscar Cruz Alvarez[1]; Ofelia Adriana Hernández Rodríguez[1]; Eliseo Sosa Montes [1]; Damaris Leopoldina Ojeda Barrios[1]

[1] Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, 31350, México

[2] Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia, 56230, México.

[3] Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Zootecnia, 56230, México.

Correo del autor de correspondencia: dojeda@uach.mx

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue analizar el efecto de la aspersión de Zn (NPs-ZnO vs $ZnSO_4$) en la composición proximal y compuestos bioactivos en flores de dalia cv Yaretzi. El estudio se realizó en la Universidad Autónoma Chapingo, para ello, se empleó un diseño completamente al azar con ocho repeticiones. Los tratamientos consistieron en cinco tratamientos, incluyendo un testigo (sin Zn^{2+}), dos concentraciones (50 y 100 mg L^{-1}) de nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) y dos concentraciones de sulfato de zinc ($ZnSO_4$: 50 y 100 mg L^{-1}). Se determinó la composición proximal, vitamina C y fenoles y flavonoides totales. El análisis estadístico no reveló efecto sobre la composición proximal y vitamina C. Sin embargo, las NPs ZnO incrementaron el contenido de fenoles totales (hasta 8.25 mg EAT/g) y flavonoides (8.21 mg EQ/g). Estos resultados son novedosos si se considera como el primer reporte de la aplicación de Zn con fines de nanofortificación en flores comestibles de dalia. Además, se promueve la diversificación de las flores de dalia, un recurso fitogenético endémico y microendémico de México.

PALABRAS CLAVE: *Alimentos funcionales; florifagia; flores comestibles; recursos fitogenéticos*.

INTRODUCCIÓN

México es un país reconocido por su biodiversidad con más de 22,000 especies, de las cuales más de 4,000 tienen usos ornamentales, alimenticios o ambos (Calderón-Jurado *et al.,* 2023). Entre ellas, se destaca el género *Dahlia*, conformada por 43 especies, donde 36 son endémicas y microendémicas y apreciadas su uso ornamental y potencial culinario de sus raíces y flores (Reyes-Santiago *et al.,* 2018). En la época prehispánica, las culturas mesoamericanas consumían sus raíces tuberosas, ricas en inulina, una fibra benéfica para personas con diabetes (Rivera-Espejel *et al.,* 2019). Además, las flores forman parte de la gastronomía tradicional mexicana, apreciadas por su sabor, textura y valor estético (Martínez-Damián *et al.*, 2021).

De forma reciente, el interés por las flores comestibles ha crecido por su perfil nutricional y funcional, al ser fuentes complementarias de compuestos bioactivos (flavonoides, antocianinas y carotenos), los cuales contribuyen al color y poseen

propiedades antioxidantes (Granados-Balbuena *et al.,* 2022). Además, aportan zinc, hierro y potasio, micronutrientes esenciales para el cuidado de la salud (Hernández-Epigmenio *et al.,* 2022). Por otro lado, la deficiencia de zinc (Zn) se relaciona con problemas en el desarrollo y mortalidad infantil (Cakmak y Kutman, 2018). Al respecto, se han impulsado estrategias de biofortificación de cultivos como una estrategia rápida y económica para el suministro de Zn a poblaciones vulnerables. En este sentido, las nanopartículas de óxido de zinc (NPs-ZnO ≤ 100 nm) ofrecen mayor eficiencia de absorción y translocación en plantas, gracias a su alta superficie y liberación controlada con respecto a fuentes convencionales como el sulfato de zinc (Rossi *et al.,* 2019). Por lo tanto, este estudio fue analizar el efecto de la aspersión de Zn (NPs-ZnO vs $ZnSO_4$) en la composición proximal y compuestos bioactivos de flores de dalia cv Yaretzi.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental y material vegetal. El estudio se realizó en 2024; se llevó a cabo un estudio en el invernadero de floricultura de la Universidad Autónoma Chapingo, en clima templado. Se utilizaron raíces tuberosas de *Dahlia* × *hortorum* cv. Yaretzi, sembradas en contenedores con sustrato peat moss-perlita (1:1). Las plantas emergieron a los 15 días y se manejaron con riego ajustado, fertilización semanal y control manual de malezas. Se evaluaron cinco tratamientos de zinc (ZnO y $ZnSO_4$ a 50 y 100 mg L^{-1}, más un testigo) aplicados foliarmente en tres etapas del desarrollo. El experimento se diseñó completamente al azar con cuatro repeticiones. Los análisis se realizaron en laboratorios especializados de la universidad.

Composición proximal. La determinación de humedad, materia seca, proteína cruda, grasa, fibra y ceniza se realizó mediante el procedimiento estándar descrito por la AOAC (2006).

Vitamina C. La cuantificación de ácido ascórbico (VC) fue determinada de acuerdo con el método estándar descrito por la AOAC (2005). Brevemente, homogenizaron 5 g de muestra de pétalo de dalia y 25 mL de ácido oxálico (0.5 %). Subsecuentemente, se tomó una alícuota de 5 mL que se tituló con solución de Tillman, hasta que permaneció en una solución rosa manteniéndose visible durante un min.

Compuestos bioactivos. La obtención del extracto se realizó según el método de Aguiñiga et al. (2017) con modificaciones. Brevemente, se mezcló 1 g de muestra con 8 mL de metanol al 80%, se agitó 1 min, se sonicó por 10 min y se dejó reposar 5 min (repitiendo este paso), se centrifugó a 200 rpm por 5 min y se tomó 1 mL del sobrenadante para análisis. La cuantificación de fenoles totales se realizó por el método de Folin-Ciocalteu adaptado a microplacas (Singleton y Rossi, 1965): se mezclaron 25 µL de extracto, 120 µL de agua, 20 µL de reactivo Folin-Ciocalteu diluido y 30 µL de Na_2CO_3 al 20%, se incubó 30 min en oscuridad y se midió la absorbancia a 760 nm, usando una curva patrón de ácido 3,4,5-trihidroxibenzoico (0.5–12.5 µg mL-1), expresando los resultados en mg equivalentes de ácido tánico por gramo de muestra seca (mg EAT/g). Para flavonoides totales, se empleó el método colorimétrico con $AlCl_3$ (Woisky y Salatino, 1998), para ello se maceraron pétalos en etanol al 70% (1:10 p/v) por 72 h, se filtró y concentró el extracto, el cual se comparó con una curva de quercetina (10–100 µg mL-1) tras mezclar con $AlCl_3$

al 2%, etanol, acetato de sodio y agua, incubando 30 min en oscuridad y midiendo la absorbancia a 415 nm, reportando los resultados en mg equivalentes de quercetina por gramo de materia seca (mg QE/g).

Análisis estadístico. Se realizó un análisis de varianza y una comparación de medias con la prueba de Tukey ($p < 0.05$). En todos los casos, se utilizó el software de análisis estadístico R, versión 4.3.1 (R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria), mediante el entorno de desarrollo RStudio, versión 2023.09.0 (RStudio PBC, Boston, EE. UU.).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Composición proximal en flores de dalia. La aplicación foliar de Zn (NPs ZnO y $ZnSO_4$) no afectó los valores de la composición proximal (Cuadro 1). Sin embargo, algunas tendencias relevantes. La humedad osciló entre 90.33% (testigo) y 91.23% (100 mg L^{-1} NPs ZnO), valores típicos en tejidos florales (Galindo-Guzmán *et al.,* 2022). La MS se incrementó levemente con NPs ZnO, alcanzando 9.66%, posiblemente por mayor acumulación de compuestos estructurales (Lara-Cortés *et al.,* 2014). La PC mostró una ligera tendencia al alza con NPs ZnO (5.56% vs. 4.63%), lo que sugiere estimulación en la síntesis proteica (Fortis-Hernández *et al.,* 2024). La GC permaneció estable (4.54–4.58%), indicando que el Zn no tuvo efecto, en línea con lo reportado por Rivera-Gutiérrez *et al.* (2021). La FC y las cenizas aumentaron ligeramente con NPs ZnO (30.32% y 13.29%, respectivamente), lo que sugiere una mayor lignificación y acumulación mineral (Galindo-Guzmán *et al*., 2022).

Cuadro 1**.** Composición proximal en flores de dalia cv Yaretzi asperjadas con NPs-ZnO y $ZnSO_4$

Tratamientos (mg L^{-1})	Humedad	MS	PC	GC	FC	C
Testigo	90.3 ± 1.3a	8.8 ± 0.9a	4.6 ± 0.2a	4.5 ± 0.2a	28.3 ± 2.3a	12. 9 ± 0.2a
^{50}NPs ZnO	90.9 ± 1.5a	9.6 ± 1.2a	5.18 ±0.1a	4.6 ± 0.1a	29.3 ± 0.2 a	12.9 ± 0.3a
^{100}NPs ZnO	91.2 ± 0.9a	9.7 ± 1.3a	5.56 ± 2.3a	4.6 ± 0.3a	30.3 ± 2.2a	13.3 ± 0.7a
$^{50}ZnSO_4$	90.7 ± 2.1a	9.1 ± 1.5a	4.8 ± 0.1a	4.6 ± 0.3a	28.5 ± 2.6a	12.8 ± 0.4a
$^{100}ZnSO_4$	90.4 ± 1.2a	9.3 ± 2.1a	4.9 ± 0.05a	4.6 ± 0.5a	28.9 ± 0.8a	12.9 ±0.2a

Los datos representan la media ± desviación estándar (n = 8). Letras diferentes (prueba de Tukey, $p \leq 0.05$) indican diferencias significativas entre tratamientos. Los datos son expresados como porcentaje y en base a peso seco. MS – materia seca, PC = proteína cruda, FC = fibra cruda, C = cenizas, NPs = nanopartículas.

Fenoles flavonoides y vitamina C. Los compuestos fenólicos y flavonoides, fitoquímicos claves en el sistema antioxidante de los tejidos vegetales, mostraron diferencias

significativas entre tratamientos, destacando el efecto estimulante de las nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO). Los tratamientos con NPs ZnO incrementaron notablemente los fenoles totales con valores de 8.22 y 8.25 mg EAT/g, respectivamente, frente al testigo (6.56 mg EAT/g). Por otro lado, el contenido de vitamina C se mantuvo sin cambios con valores que fluctuaron 1.12 y 1.34 mg 100 g (Cuadro 2). Estos resultados sugieren que las NPs ZnO afectan selectivamente la ruta de los fenilpropanoides, clave en la síntesis de metabolitos secundarios como los fenoles y flavonoides.

El incremento en el contenido de fenoles totales coincide con estudios previos que vinculan las NPs ZnO con la inducción de estrés oxidativo moderado, activando la síntesis de metabolitos secundarios (Galindo-Guzmán *et al.,* 2022). Asimismo, la aplicación de NPs ZnO en lechuga incrementó los valores de flavonoides totales (8.200–8.212 mg EQ/g) con respecto al testigo, sugiriendo una activación de rutas metabólicas asociadas a su biosíntesis, mediada por señalización redox (Fortis-Hernández *et al.,* 2024). Comparativamente, el sulfato de zinc ($ZnSO_4$) también incrementó estos compuestos, pero en menor medida (7.725 mg EAT/g PF y 7.242 mg EQ/g PF con 100 mg L^{-1}), respaldando la mayor eficacia de las NPs ZnO debido a su alta área superficial y capacidad de penetración celular (Rivera-Gutiérrez *et al.,* 2021). Los valores obtenidos superan los reportados en otras flores como buganvilia, cempasúchil y dalias (Barriada-Bernal *et al.,* 2014), evidenciando el potencial de las NPs ZnO para mejorar el perfil nutricional de las flores comestibles.

Cuadro 2. Contenido de fenoles totales, flavonoides totales y vitamina C en flores de dalia cv Yaretzi sometidas a la aplicación foliar de ZnO NPs y $ZnSO_4$.

Tratamientos (mg L^{-1})	**FT**	**FLT**	**VC**
Testigo	6.6 ± 1.20 b	5.9 ± 1.5 c	1.1 ± 0.1 a
^{50}NPs ZnO	8.2 ± 1.0 a	8.2 ±1.4 a	1.3 ± 0.3 a
^{100}NPs ZnO	8.3 ± 1.1 a	8.2 ±1.5 a	1.3 ± 0.2 a
$^{50}ZnSO_4$	7.5 ± 1.0 ab	6.1±1.2 c	1.2 b± 0.1 a
$^{100}ZnSO_4$	7.7 ± 1.2 a	7.2± 1.1 b	1.3 ± 0.4 a

Valores medios ± desviación estándar (n = 8); los valores con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente (P ≤ 0,05; prueba de Tukey). Los datos se expresan en peso fresco. ZnO NPs- nanopartículas de óxido de zinc; $ZnSO_4$ - sulfato de zinc. FT – fenoles totales (mg EAT g-1), FLT = flavonoides totales (mg EQ g-1) y VC = vitamina C (mg 100 g^{-1}).

CONCLUSIONES

Las dosis y fuentes de Zn asperjadas no afectaron los valores de la composición proximal en las flores de dalia cv Yaretzi. Por otro lado, la aplicación de NPs ZnO incrementó el contenido de fenoles y flavonoides, manteniendo la vitamina C sin cambios. Estos resultados evidencian el potencial de la nanofortificación en dalia, un recurso fitogenético endémico de México.

BIBLIOGRAFÍA

AOAC. (2005). *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists* (18th ed.). AOAC International.

AOAC. (2006). *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists* (19th ed.). AOAC International.

Barriada-Bernal, L. G., Almaraz-Abarca, N., Delgado-Alvarado, E. A., Gallardo-Velázquez, T., Ávila-Reyes, J. A. & Torres-Morán, M. I. (2014). Flavonoid composition and antioxidant capacity of the edible flowers of *Agave durangensis* (Agavaceae). *CyTA – Journal of Food, 12*(2), 105–114. https://doi.org/10.1080/19476337.2013.801037.

Cakmak, I. & Kutman, U. B. (2018). Agronomic biofortification of cereals with zinc: A review. *European Journal of Soil Science, 69*(1), 172–191. https://doi.org/10.1111/ejss.12437.

Calderón-Jurado, M., Cruz-Álvarez, O., Juárez-López, P., Hernández-Rodríguez, O.A., Orozco-Meléndez, L.R., Morales-Maldonado, E.R., Ojeda-Barrios, D.L. & Alia-Tejacal, I. (2023). Bioactive compounds, minerals and antioxidants of edible flowers of peach and apple. *International Journal of Food Properties, 26*(1), 1855–1866.

Fortis-Hernández, M., Pivaral-Chávez, A.G., Galindo-Guzmán, A. P., Preciado-Rangel, P., Ruiz-Ortega, F. J. & Trejo-Valencia, R. (2024). Nanopartículas de óxido de zinc para incrementar rendimiento, compuestos bioactivos y actividad enzimática en lechuga. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, *11*(1).

Galindo-Guzmán, A. P., Fortis-Hernández, M., De La Rosa-Reta, C. V., Zermeño-González, H. & Galindo-Guzmán, M. (2022). Síntesis química de nanopartículas de óxido de zinc y su evaluación en plántulas de Lactuca sativa. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *13*(SPE28), 299-308. https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3284.

Granados-Balbuena, S. Y., Santacruz-Juárez, E., Canseco-González, D., Aztatzi-Rugerio, L., Sánchez-Minutti, L., Ramírez-López, C. & Ocaranza-Sánchez, E. (2022). Identification of anthocyanic profile and determination of antioxidant activity of *Dahlia pinnata* petals: A potential source of anthocyanins. *Journal of Food Science, 87*(3), 1231–1242. https://doi.org/10.1111/1750-3841.16072.

Hernández-Epigmenio, F., García-Mateos, M. D. R., Sosa-Montes, E., Mejía-Muñoz, J. M., Fernández-Pavia, Y. L., Cruz-Álvarez, O. & Martínez-Damián, M. T. (2022). Phenolic profile and nutritional value of Dahlia x hortorum flowers. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, *28*(3), 161-174. https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2022.03.004.

Lara-Cortez, J., López-Pérez, M. & Martínez-Damián, M.T. (2014). Potencial alimenticio de las raíces tuberosas de dalia: contenido de inulina y valor nutracéutico. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 5(3), 601–610.

Martínez-Damián, M.T., Mejía-Muñoz, J.M., Colinas-León, M. T., Hernández-Epigmenio, F. & Cruz-Álvarez, O. (2021). Nutritional value, bioactive compounds and antioxidant capacity in edible flowers of dahlia. *Acta Scientiarum Polonorum, Hortorum Cultus, 20*(5), 63–72. https://doi.org/10.24326/asphc.2021.5.6.

Reyes-Santiago, J., Islas-Luna, M. de los Á., Macías-Flores, R.G. & Castro-Castro, A. (2018). *Dahlia tamaulipana* (Asteraceae, Coreopsideae), a new species from the Sierra Madre Oriental biogeographic province in Mexico. *Phytotaxa, 349*(3), 214–222. https://doi.org/10.11646/phytotaxa.349.3.2.

Rivera Espejel, E. A., Cruz Álvarez, O., Mejía Muñoz, J. M., García Mateos, M. del R., Colinas León, M. T. B. & Martínez Damián, M. T. (2019). Physicochemical quality, antioxidant capacity and nutritional value of edible flowers of some wild dahlia species. *Folia Horticulturae, 31*(2), 331–342. https://doi.org/10.2478/fhort-2019-0026.

Rivera-Gutiérrez, R.G., Preciado-Rangel, P., Fortis-Hernández, M., Betancourt-Galindo, R., Yescas-Coronado, P. & Orozco-Vidal, J. A. (2021). Nanoparticulas de óxido de zinc y su efecto en el rendimiento y calidad de melón. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *12*(5), 791-803. https://doi.org/10.29312/remexca.v12i5.2987.

Rossi, L., Fedenia, L. N., Sharifan, H., Ma, X. & Lombardini, L. (2019). Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, *135*, 160-166.

Singleton, V. L. & Rossi, J. A., Jr. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic–phosphotungstic acid reagents. *American Journal of Enology and Viticulture, 16*(3), 144–158.

Tomasik, P. (2003). *Food carbohydrates: Chemistry, physical properties, and applications*. CRC Press.

Woisky, R. G. & Salatino, A. (1998). Analysis of propolis: Some parameters and procedures for chemical quality control. *Journal of Apicultural Research, 37*(2), 99–105. https://doi.org/10.1080/00218839.1998.11100961.

EVALUACIÓN DE INSUMOS NUTRICIONALES COMPLEMENTARIOS EN RENDIMIENTO Y NUTRICIÓN DEL AGUACATERO

Luis Mario Tapia Vargas[1]; Adelayda Stephany Hernández Valencia[2]; Anselmo Hernández Pérez[1]

[1] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Av. Latinoamericana 1101 C.P. 60150, Uruapan, Mich., México.
[2] Colegio de Postgraduados, Instituto de Fitosanidad, Km 36.5 Carr. México-Texcoco. C.P. 56230, Texcoco, Estado de México, México.
Correo del autor de correspondencia: tapia.luismario@inifap.gob.mx

RESUMEN

El cultivo del aguacate en términos económicos es el fruto más exportado en México y el fruto que genera los mayores ingresos en Michoacán. Los suelos son de baja fertilidad, bajo contenido de materia orgánica y constante lixiviación de nutrientes. El objetivo de este trabajo fue aplicar insumos nutricionales complementarios y evaluar su desempeño en el rendimiento y la nutrición foliar del cultivo. El trabajo se desarrolló desde el año 2018 hasta el 2022 con 4 tratamientos nutricionales consistentes en estimulante mineral más aminoácidos en dos dosis experimentales (EA_1 y EA_2), bioestimulante natural derivado de algas *Ascophyllium nodosum* (BN), bioestimulante radicular (BR) aplicado al suelo, de elementos minerales más aminoácidos y testigo con manejo nutricional convencional del productor (T). Los resultados indican mayor amarre de fruto con EA_1 y BR con más de 31 frutos perdigón por inflorescencia, BN y BR produjeron más de 75% de floración y mayor número de frutos perdigón con más de 25.4 por panícula. La nutrición foliar fue mejor en los tratamientos EA_1 y BR con hasta 2.8% de nitrógeno foliar, 0.13 de P foliar y 1.5% de K foliar. El rendimiento de fruto fue mayor en los tratamientos EA_1 y BR con hasta 485 frutos árbol^{-1} y 26.2 ton ha^{-1}, el testigo fue el más bajo con 18.3 ton ha^{-1} y sólo 315 frutos producidos. Se concluye que los insumos EA_1 y BR pueden producir mayor floración, más amarre, mayor producción de fruto y mejor condición nutricional foliar en el aguacate.

PALABRAS CLAVE: *Aguacate; complementos nutricionales; producción*.

INTRODUCCIÓN

El cultivo del aguacate en México alcanza anualmente 2.8 millones de toneladas de fruto, con un valor global de 2,900 millones de dólares, el estado de Michoacán, la región productora más importante del mundo, produce 2.1 millones de toneladas de fruto, con un valor de 2,100 millones de dólares (SIAP, 2024). Tradicionalmente, las plagas, enfermedades y la baja fertilidad del suelo, limitan la productividad del cultivo (Quinceno-Rico *et al.*, 2020), pero la tecnología de producción, con nuevas moléculas más amigables ecológicamente han logrado mejor control de plagas y enfermedades, sin embargo, los suelos donde se produce aguacate son deficitarios de manera natural de

nutrientes, lo cual limita la productividad del cultivo, las deficiencias nutricionales se manifiestan en el árbol con decoloraciones, necrosis, manchas cloróticas y deformaciones de la hoja, Joyce *et al*., (2021), mencionan además, efecto en la calidad de fruto y susceptibilidad a daños en post-cosecha. Actualmente, se han logrado nuevos insumos sintetizados a partir de compuestos orgánicos y minerales, que mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo (Villalba-Morales et al, 2019), lo que propicia incremento de la disponibilidad temporal y espacial de nutrientes en la zona radicular del cultivo (Tapia-Vargas *et al*., 2014)), además, nuevos insumos foliares orgánicos y sintéticos pueden complementar la nutrición edáfica y proporcionar nutrientes y hormonas benéficas al cultivo, este sentido, el objetivo de esta trabajo fue evaluar nuevos productos naturales y orgánicos y su efecto en la floración, amarre y rendimiento de fruto y la nutrición foliar del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció a partir de octubre del año 2018 a mayo de 2022 en la localidad de Jicalán, perteneciente al municipio de Uruapan, Mich., la Huerta está localizada a 19° 23' 47" latitud norte y 102° 02' 46" longitud oeste. Tiene al inicio del experimento 7 años de edad de la variedad Hass, el suelo es Andosol, con una profundidad de 90 cm, libre de sales, pH=6.5 bajo contenido de materia orgánica (3.1%) 6.2 ppm de nitrógeno, de fósforo 5.1 ppm, 180 ppm de potasio y excelente drenaje. Se evaluaron tres tratamientos orgánicos foliares: 1) y 2). EA_1 y EA_2, nutrientes minerales foliares con aminoácidos (composición P_2O_5, 9.5%, Mo 10.0% y K_2O 12.6%, B 8% y aminoácidos libres 5%), en dosis de 0.5 y 1.0 kg ha^{-1}, respectivamente. 3. BN bioestimulante foliar a base de extractos de *Ascophyllum nodosum* (10%) + CaO, 7.8%, B, 0.20%), con siete aplicaciones mensuales en dosis de 1.0 L ha^{-1}. 4. Un tratamiento al suelo nombrado BR consistente en bioestimulante radicular (composición P_2O_5, 9.5%, Mo 10.0% y K_2O 12.6%, B 8% y aminoácidos libres 5%), en dosis de 10 aplicaciones bimestrales 3 L ha^{-1}, 5. Testigo con manejo del productor, más foliares minerales (T). El diseño experimental fue completamente al azar con 10 repeticiones por tratamiento, se tomó cada árbol como una repetición, los tratamientos se separaron con una hilera de árboles sin aplicación. El análisis estadístico consistió en ANOVA con SAS v 2010, se utilizó separación de medias con Tukey al 5%. Las variables evaluadas en cuatro ramas marcadas con listones rojos fueron: floración, amarre de fruto (número de frutos por inflorescencia), rendimiento de fruto (kg $árbol^{-1}$) y número de frutos por árbol y contenido de nitrógeno, fósforo y potasio foliar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos indican que no hubo efecto de tratamientos, en las variables floración, número de frutos munición y número de frutos canica (Cuadro 1). Esto indica que al menos en etapas tempranas de formación de fruto los tratamientos no tienen efecto, aunque numéricamente se observa que hay mayores porcentajes de floración en los tratamientos con aplicación de insumos foliares, asimismo, hay tendencia en tener mayor cantidad de fruto munición y perdigón en los tratamientos propuestos en

comparación al testigo que presenta los valores uniformemente más bajos (Cuadro 1), a pesar de no haber diferencia significativa, esto puede indicar que un mejor manejo nutricional foliar puede proveer mayor cantidad de frutos cuajados como asegura Gazit y Degani (2002). Al efectuar el análisis de nutrientes en el tejido foliar, se aprecia que existe diferencia significativa en nitrógeno y potasio, pero no en fósforo, este efecto puede probar que es posible aumentar la condición nutricional con aplicaciones de nutrientes y compuestos orgánicos en la hoja (Alcaraz *et al.,* 2013).

Cuadro 1. Comparación de valores promedio de floración, número de frutos cerillo, número de frutos cuajados.

Tratamiento foliar	**Floración (%)**	**Número de fruto munición**	**Numero de fruto perdigón**	**N (%)**	**F (%)**	**K (%)**
EA 0.5 kg ha^{-1}	21.1a	41.6a	31.6a	2.8a	0.13a	1.5a
EA 1.0 kg ha^{-1}	11.5a	41.0a	30.4a	2.6a	0.11a	1.1ab
BN 1.0 L ha^{-1}	21.8a	38.5a	30.2a	2.4ab	0.12a	1.1ab
BR 3.0 L ha^{-1}	17.9a	40.3 a	31.3a	2.7a	0.11a	1.4ab
Testigo P	17.1a	38.3 a	29.5a	2.1b	0.09a	1.0b
DMS (Tukey 5%)	12.1	4.7	2.3	0.5	0.06	0.4

Nota: valores medios con la misma letra o sin letra son estadísticamente iguales (P > 0.95. EA= estimulante de aminoácidos más minerales, BN= extracto natural de algas, BR= bioestimulante radicular, P= productor, N= nitrógeno, P= fósforo, K= potasio.

La producción de fruto se presenta en la Figura 1 donde se aprecia que se obtuvo mayor número de frutos en el tratamiento con 0.5 kg ha^{-1} de elementos minerales más aminoácidos, con 485 frutos cosechados por árbol, sin embargo, al incrementar la dosis a 1.0 kg ha^{-1} de este insumo, se tiene un efecto detrimental en reducir tanto el número de frutos como el rendimiento de fruto, pues cae el número de frutos en 14% y el rendimiento en 13%. El tratamiento con aplicación al suelo de elementos nutritivos más aminoácidos (BR) tuvo un efecto también significativo con un rendimiento de 24.5 ton ha^{-1}. Ambas variables indicadoras de productividad, tuvieron incremento en todos los tratamientos que incluyeron insumos foliares o al suelo, siendo el testigo el que manifestó menor productividad con sólo 310 frutos por árbol y 18.3 ton ha^{-1}, lo cual indica que en efecto el suelo presenta bajas condiciones de elementos nutritivos disponibles, el uso de insumos complementarios vía foliar puede mejorar la productividad del árbol como lo menciona Selladurai y Mahdav (2020).

Por otra parte, cabe indicar que todos los tratamientos tuvieron beneficio en producir más frutos por árbol y mayor rendimiento por hectárea que el tratamiento testigo, lo cual coincide con lo reportado por Muhammad *et al*., 2024, en el sentido de que se reducen los efectos de deficiencias nutricionales del aguacatero, mediante estrategias de manejo nutricional como la aplicación foliar en etapas críticas del cultivo

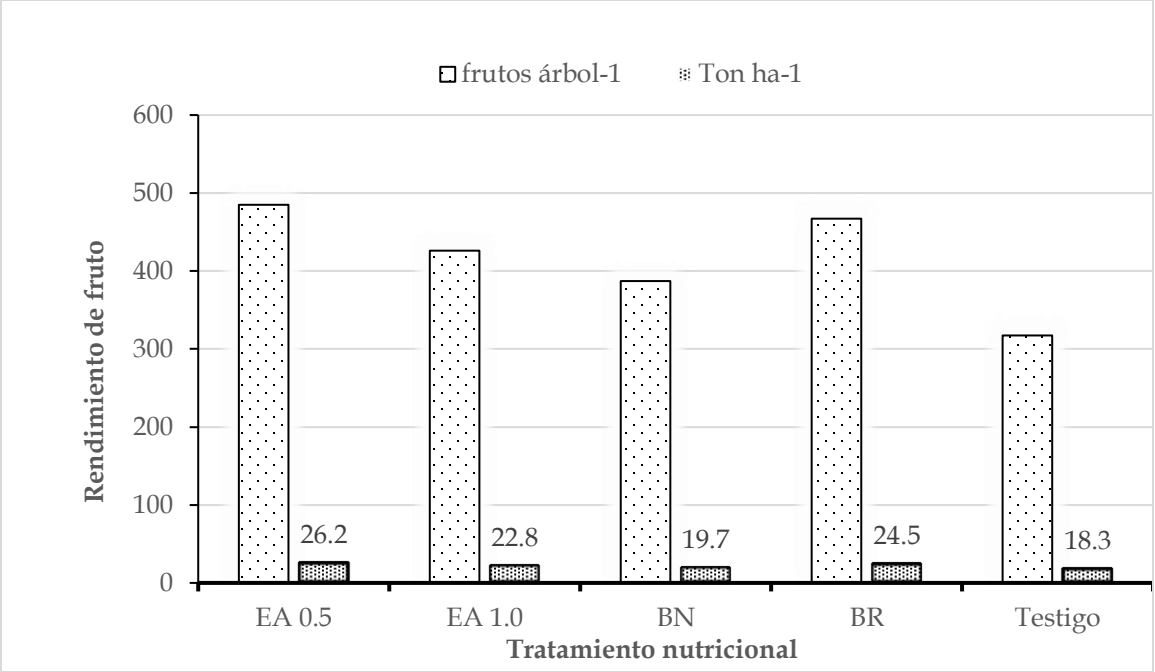


Figura 1. Efecto de las aplicaciones de insumos foliares y al suelo en el rendimiento y número de frutos producidos de aguacate.

CONCLUSIONES

Debido a la naturaleza de los suelos aguacateros de Michoacán que son de baja fertilidad natural, el uso de insumos naturales derivados de algas de *A. nodosum* combinando con la aplicación de elementos minerales, pueden coadyuvar a incrementos en la nutrición foliar, mayor amarre de fruto y finalmente mayor cantidad de frutos producidos y mayor rendimiento de fruto por unidad de área, el uso de elementos minerales más aminoácidos en dosis de 0.5 kg ha^{-1} y de

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el financiamiento de esta investigación a Tradecorp México por su apoyo a la investigación científica

BIBLIOGRAFÍA

Alcaraz, M.L., Throp T.G. & Hormaza, J.I. (2013). Phenological growth stages of avocado (Persea americana) according to the BBCH scale. *Scientia Horticulturae,* 164, 434-439.

Gazit, S. & Degani, C. (2002). Reproductive biology. In: A.W. Whiley, B. Schaffer and B.N. Wiolstenholme, Editors, The Avocado, CABI Publishing, Oxon (2002), pp. 101–133.

Joyce, D., Perkins, M., Newett, S., Coates, L. Irvine, B. S.2021. Mineral nutrition for avocado fruit quality: a brief review and recommendations. ISHS Acta Horticulturae 1333.

Muhammad, A. M., Muhammad, S. A., Muhammad A. B. S., Xiaohui C., Zaib U.N., Xiaojun Y., Iqra, F., Muhammad, Z. M., Wenhao, Y., Baoming J., Chaoyuan, Z., & Liangquan, W. 2024 Nutrient stress signals: Elucidating morphological, physiological, and molecular responses of fruit trees to macronutrients deficiency and their management strategies. Scientia Horticulturae 329, 112985.

Quiceno-Rico, Londoño, C.V., Mora G.C., Giraldo, F.G.A., Molina, M., Morales, A.B.L & Pássaro, C. C. (2020). Diagnóstico de aspectos productivos y ambientales en el cultivo de Aguacate Hass del Oriente Antioqueño. Encuentro SENNOVA Del Oriente Antioqueño, 5(1), 45–63. https://doi.org/10.23850/26652447/5/1/2767

SIAP, Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2024. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. SAGAR. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/

Selladurai, R., & Mahdav, C. (2020). Nutrient management for avocado. J. of Plant Nutrition 43(1):138-147

Tapia V.L.M., Larios G.A., Hernández P. A., Diaz, G. T. & Guillén, A.H. 2014. Nutrición orgánica del aguacate C.V. Hass efecto nutrimental y agronómico. Rev. Mex. De Cs. Agrics.

Villalva, M. A., Damián N. A., González, H. V.A., Talavera M. O., Hernández C. E., Palemón, A. F., Díaz,V. G. & Sotelo, N. H.. 2015. Chemical and organic nutrition in Hass avocado in Filo de Caballos, Guerrero, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas,* 6(spe11), 2169-2176. https://doi.org/10.29312/remexca.v0i11.794.

INFLUENCIA DEL SILICIO EN LA CALIDAD POSTCOSECHA DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.)

José Amilcar Morales López[1]; Víctor Manuel Ordaz Chaparro[1]; Sara Monzerrat Ramírez Olvera[1]; Olga Gómez Rodríguez[2]; Manuel Sandoval Villa[1]; Fernando Carlos Gómez Merino[3]

[1] Posgrado en Edafología, [2] Posgrado en Fitosanidad, [3] Posgrado en Fisiología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, km 36.5 Carr. México-Texcoco, 56264, Estado de México, México.

Correo del autor de correspondencia: ordaz@colpos.mx

RESUMEN

El jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) es un cultivo de gran valor económico, nutricional y estratégico para México, cuyo éxito comercial está estrechamente ligado a la calidad del fruto. El silicio (Si) ha demostrado efectos benéficos en diversos cultivos agrícolas, principalmente al mejorar la tolerancia al estrés y prolongar la vida postcosecha. No obstante, su impacto sobre parámetros físicos en especies hortícolas no acumuladoras, como el jitomate, aún no está claramente definido. En este estudio se evaluó el efecto de la aplicación de Si en concentraciones de 1.5 y 3 mM sobre la calidad postcosecha de frutos de jitomate híbrido CID F1, considerando las variables de contenido de humedad, color y firmeza, bajo condiciones controladas de invernadero y utilizando un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. Los resultados indicaron que la aplicación de Si no produjo efectos significativos ($P \leq 0.05$) en ninguna de las variables evaluadas en comparación con el tratamiento testigo, lo que sugiere que sus beneficios podrían depender de la interacción genotipo-ambiente o de la presencia de factores de estrés. Se concluye que, bajo las condiciones del presente estudio, no se encontró evidencia suficiente para afirmar que el Si mejora directamente los atributos físicos de calidad postcosecha en frutos de jitomate híbrido CID F1.

PALABRAS CLAVE: *Agricultura sostenible, color, contenido de agua, concentraciones de silicio, firmeza.*

INTRODUCCIÓN

El jitomate (*S. lycopersicum* L.) es un cultivo de gran relevancia estratégica e histórica para México, no solo por su valor económico, cultural y nutricional, sino también por su posición en el mercado internacional, donde el país se ubica como el séptimo productor mundial y el principal exportador de jitomate fresco, con más de 4.4 mil millones de toneladas enviadas principalmente a Estados Unidos y Canadá (FAOSTAT, 2023; Secretaría de Economía, 2024). En el ciclo agrícola 2024 se cultivaron 45,793.35 hectáreas, destacando Sinaloa, Sonora y Jalisco como los principales estados productores (SIAP, 2024). La competitividad del jitomate en el mercado global se sustenta en sus ventajas comparativas, definidas por los costos de producción y comercialización, así como por la calidad del fruto, cuyas características como color, firmeza, textura, apariencia y sabor son factores clave que demanda el mercado (Tochihuitl, 2016; Salgado *et al*., 2011).

Se han documentado los efectos benéficos del Si en diversos cultivos. Este elemento, es el segundo más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno, es considerado cuasi-esencial para las plantas superiores (Mateus-Jiménez, 2024).

La aplicación de Si mejora la tolerancia a factores bióticos y abióticos, optimiza el metabolismo fotosintético y aumenta la calidad y productividad de cultivos (Cázarez-Flores *et al*., 2023). Sin embargo, persisten vacíos de conocimiento sobre los efectos de diferentes dosis de Si en especies hortícolas no acumuladoras de este elemento. Esta brecha de conocimiento respalda la necesidad de investigar estrategias para incrementar el rendimiento productivo, mejorar los parámetros de calidad del fruto y prolongar la vida útil postcosecha en condiciones de comercialización del jitomate (Mateus-Jiménez, 2024).

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación de Si (en concentraciones de 1.5 y 3 mM) sobre parámetros de calidad postcosecha en jitomate, específicamente en el contenido de humedad, color y firmeza de frutos, bajo condiciones controladas del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo entre junio y diciembre de 2024 en un invernadero del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Se trasplantaron plántulas de jitomate (*S. lycopersicum* L.), híbrido CID F1, de 33 días de edad, en bolsas de polietileno de 40 × 40 cm, utilizando tezontle como sustrato. La nutrición se suministró mediante la solución nutritiva universal de Steiner (1984), aplicada en dosis crecientes conforme al desarrollo fenológico de las plantas.

Trece días después del trasplante, se inició la aplicación de Si vía foliar y al sustrato en tres concentraciones diferentes: 0 (testigo), 1.5 y 3 mM. Se realizaron un total de siete aplicaciones con un intervalo de 14 días entre cada una, utilizando como fuente de Si metasilicato de sodio grado reactivo ($Na_2O_3Si \cdot 5H_2O$) disuelto en agua destilada. En el tratamiento testigo (0 mM) únicamente se aplicó agua destilada.

Para los análisis de calidad, se recolectaron frutos con color rojo uniforme del primer racimo para evaluar el color y la firmeza, y del tercer racimo para determinar el contenido de humedad. Las variables evaluadas fueron: contenido de humedad, color y firmeza de los frutos.

Para determinar el contenido de humedad, se registró el peso fresco del fruto utilizando una balanza digital de precisión. Posteriormente, el fruto se cortó en fragmentos pequeños, se colocó en un recipiente de vidrio previamente tarado y se introdujo en estufa a 75 °C hasta alcanzar peso constante. Finalmente, se registró el peso seco para calcular el porcentaje de humedad mediante la diferencia entre el peso fresco y el peso seco.

El parámetro de color se determinó utilizando el sistema CIEL*a*b* mediante un colorímetro de precisión modelo NR20XE. La medición se realizó directamente en la pulpa del fruto. Los parámetros registrados fueron los siguientes:

L*: representa la luminosidad de la muestra, con valores que oscilan entre 0 (negro) y 100 (blanco).

a*: Indica la posición en el eje rojo-verde, donde valores positivos (+60) corresponden a tonos rojizos/púrpuras y valores negativos (-60) a tonalidades verdes.
b*. Refleja la posición en el eje amarillo-azul; valores positivos indican coloración amarilla y los negativos, azul.

Con base en los valores de a* y b*, se calculó la cromaticidad (C*), la cual describe la pureza o intensidad del color. El cálculo se realizó según la fórmula propuesta por McGuire (1992): $C = (a^* + b^{*2})^{1/2}$

La firmeza se determinó con un penetrómetro digital Force Five Modelo FDV-30 (Wagner Instruments, EE. UU.), expresando los resultados en newtons (N). Se tomaron dos lecturas de cada fruto.

El diseño experimental empleado fue completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza, y la comparación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$), utilizando el programa SAS Studio 9.4 (Copyright © 2025, SAS Institute).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto del Si en el contenido de humedad de los frutos. La aplicación de Si en concentraciones de 1.5 y 3 mM, no mostró diferencias estadísticamente significativas en el contenido de humedad de los frutos de jitomate en comparación con el testigo (94.6850 ± 1.0842 a, 94.7000 ± 2.0685 a, 94.0875 ± 0.9062 a, para Si 0, 1.5 y 3 mM en el mismo orden; Tukey $P \leq 0.05$, n = 4). Estos resultados sugieren que, bajo las condiciones evaluadas, el Si no influye de manera directa en la retención de agua en los frutos.
Efecto del Si en el color de los frutos. No se observaron diferencias significativas en la cromaticidad (C) de los frutos entre los tratamientos con Si y el testigo (551.3925 ± 61.0022 a, 559.9900 ± 31.2715 a, 608.8175 ± 68.3937 a, para Si 0, 1.5 y 3 mM en el mismo orden; Tukey $P \leq 0.05$, n = 4). Esto indica que, en el racimo evaluado, la aplicación de Si no modificó las características de coloración del fruto.
Efecto del Si en la firmeza de los frutos. Tampoco se detectó un efecto significativo ($P \leq 0.05$) de las aplicaciones de Si en la firmeza de los frutos en comparación con el testigo (0.5450 ± 0.1234 a, 0.5300 ± 0.0294 a, 0.6225 ± 0.0842 a, para Si 0, 1.5 y 3 mM en el mismo orden; Tukey $P \leq 0.05$, n = 4). Estos hallazgos sugieren que, bajo las condiciones experimentales evaluadas, el Si no ejerce un impacto perceptible en la consistencia del fruto.

Los resultados indican que la aplicación de Si en concentraciones de 1.5 y 3 mM aplicado vía foliar y al sustrato, no indujo efectos significativos ($P > 0.05$) sobre el contenido de humedad, color o firmeza en frutos de jitomate (*S. lycopersicum* L.) híbrido CID F1, en comparación con el testigo. Estos hallazgos difieren significativamente de los reportados por Reyes-Pérez *et al.* (2023) y Wang *et al.* (2024), quienes documentaron efectos positivos del Si en atributos de calidad postcosecha en cultivares de jitomate.

Una posible explicación para la ausencia de efectos observados podría estar relacionada con el intervalo de las aplicaciones o que las concentraciones utilizadas no hayan sido adecuadas para inducir cambios detectables en los atributos físicos del fruto. También es posible que el híbrido empleado tenga una respuesta fisiológica menos

sensible al Si bajo las condiciones evaluadas. Wang *et al*. (2024) reportaron diferencias significativas en firmeza, color y sólidos solubles al aplicar Si de forma foliar a intervalos de siete días, con una concentración de 1.2 mM en jitomate cv. Jingfan 502.

En cuanto al color, los resultados indican que la aplicación de Si no tuvo un efecto significativo en la síntesis de pigmentos asociados a la maduración del fruto, como los carotenoides. Este hallazgo contrasta con lo reportado por Hu *et al*. (2023) y Wang *et al*. (2023), quienes observaron que la aplicación foliar de Si, en intervalos de siete días, en concentraciones de 1 mM y 1.2 mM, respectivamente, promovió el cambio de color en frutos de jitomate, mejorando su calidad.

Respecto a la firmeza, la ausencia de un efecto significativo podría atribuirse a una acumulación insuficiente de Si en las paredes celulares del fruto o al estadio de desarrollo evaluado (primer racimo), el cual podría no ser el más sensible para detectar cambios en esta variable. Este resultado coincide con lo reportado por Cázarez-Flores *et al.* (2023), quienes, al aplicar por única vez en el suelo, una solución de Si (Diatomix® con 94% de Si) en concentraciones de 20, 30 y 50 mg L^{-1} en jitomate indeterminado cv. La Gema, no observó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos. Sin embargo, contrasta con los hallazgos de Wang *et al.* (2023), quienes reportaron un aumento en la firmeza de frutos de jitomate (cv. Jingfan 502, con aplicaciones foliares a intervalos de 7 días) con coloración roja uniforme al aplicar una concentración de 1.2 mM de Si.

CONCLUSIONES

Bajo las condiciones experimentales evaluadas de este estudio, la aplicación de Si en concentraciones de 1.5 y 3 mM, aplicadas vía foliar y al sustrato, no tuvo efectos significativos sobre el contenido de humedad, color ni firmeza de los frutos de jitomate híbrido CID F1, por lo que se abre la posibilidad de realizar estudios complementarios que consideren diferentes momentos de aplicación, mayores concentraciones, otras fuentes y condiciones de cultivo, para esclarecer el papel del Si en la calidad del fruto.

BIBLIOGRAFÍA

Cázarez-Flores L.L., Angulo-Castro A., Vega-Gutiérrez T.A., Ayala-Tafoya F. & Aguilar-Quiñonez J.A. (2023). Producción de tomate en respuesta a dosis de silicio. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 10(3): e3851. DOI: 10.19136/era.a10n3.3851

FAOSTAT. (2023). Productos por país. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/faostat/es/#rankings/commodities_by_country

Hu, W., Su, Y., Yang, R., Xie, Z. & Gong, H. (2023). Effect of Foliar Application of Silicon and Selenium on the Growth, Yield and Fruit Quality of Tomato in the Field. *Horticulturae*, *9*(10). https://doi.org/10.3390/horticulturae9101126

Mateus-Jiménez, D. (2024). Evaluación de silicio líquido sobre el crecimiento, calidad de fruto y poscosecha en tomate (*Solanum lycopersicum* var. Chonto) bajo condiciones protegidas. (Tesis de Maestría. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales). https://repository.udca.edu.co/handle/11158/5639

Reyes-Pérez, J. J., Tipán-Torres, H. C., Llerena-Ramos, L. T., Hernández-Montiel, L.G. & Rivas-García, T. (2023). Silicon increased the growth, productivity, and nutraceutical quality of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *51*(2), 1–13. https://doi.org/10.15835/nbha51213155.

Salgado M.L., Ramírez V.P., Saucedo V.C., Rodríguez G.M. N., Miranda C.S., Utrera, Q.F. (2011). Calidad poscosecha en frutos de poblaciones nativas de jitomate. (pp 1-7). Colégio de Postgraduados.

Secretaría de Economía. (2024). Intercambio comercial de México. Tomates frescos o refrigerados. https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/product/tomatoes-fresh-or-chilled?redirect=true#:~:text=Los principales orígenes comerciales de,Marruecos (US$1%2C276M).

SIAP. (2024). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/.

Steiner, A.A. (1984). The universal nutrient solution. *Sixth International Congress on Soiless Culture. ISOSC. Proceedings*. The Netherlands. pp 633 -649.

Tochihuitl Martiñon, G.A. (2016). Maduración y calidad de cinco poblaciones nativas y dos híbridos comerciales de jitomate cosechados en cinco estados de madurez. (Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados). Repositorio COLPOS. http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/handle/10521/4086.

Wang, L., Jin, N., Xie, Y., Zhu, W., Yang, Y., Wang, J., Lei, Y., Liu, W., Wang, S., Jin, L., Yu, J. & Lyu, J. (2024). Improvements in the Appearance and Nutritional Quality of Tomato Fruits Resulting from Foliar Spraying with Silicon. *Foods*, *13*(2), 1–16. https://doi.org/10.3390/foods13020223.

EFECTO DE LA APLICACIÓN DE BACTERIAS TIPO PGPR Y DE AGENTES BIOESTIMULANTES EN EL CULTIVO DE BRÓCOLI (*Brassica oleracea* var. *italica*)

Guadalupe González Luna[1,3]; Moisés Graciano Carcaño Montiel[1]; Leticia Gómez Velázquez[1,2]; Guadalupe Medina de la Rosa[1,4]; Luis Martín Gutiérrez Flores[1,4]; Lucía López Reyes[1,2]

[1] Centro de Investigaciones en Ciencias Microbiológicas, [2] Posgrado en Ciencias Ambientales, [3] Facultad de Ciencias Biológicas. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Edificio IC 11, Ciudad Universitaria, Colonia San Manuel, Puebla, Pue. C.P. 72570.

[4] Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación. CP. 03940. Cd. México, México.

Correo del autor de correspondencia: moises.carcano@correo.buap.mx

RESUMEN

El brócoli (*Brassica oleracea* var. *italic*a) es una hortaliza con un alto valor nutricional, posee propiedades antioxidantes, anticancerígenas y antimicrobianas. A nivel mundial, México ocupa el quinto lugar como productor de brócoli. En el ámbito nacional, Puebla es considerado como uno de los estados de mayor producción. Existen estrategias biotecnológicas para la nutrición del cultivo, mediante la aplicación de biofertilizantes a base de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) y agentes bioestimulantes. Se realizó una prueba de germinación de semillas inoculadas con PGPR, *in vitro* y experimentos en invernadero y campo, donde se aplicaron 10 tratamientos al cultivo de brócoli y 3 aplicaciones foliares de agentes bioestimulantes (ácidos orgánicos, ácidos húmicos, macro y micronutrientes), así como una fertilización sintética. Se evaluó la masa fresca, la masa del florete, la longitud de la raíz y la altura. Se observó que la inoculación con PGPR, en combinación con bioestimulantes como ácidos orgánicos, húmicos y fertilización sintética al 50%, tiene efectos positivos sobre la germinación y el desarrollo de las plantas de brócoli. Esto demuestra que esta es una alternativa efectiva y sostenible para los productores, ya que mejora el desarrollo y la productividad del cultivo sin causar problemas ambientales como la degradación del suelo.

PALABRAS CLAVE: *Biofertilizantes; bioestimulantes; fertilizantes; hortalizas.*

INTRODUCCIÓN

El brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica)* es una hortaliza con un alto valor nutricional, propiedades anticancerígenas, antioxidantes y antimicrobianas. Además, tiene una creciente relevancia en los mercados globales. México ocupa el quinto lugar como el país con mayor producción y el segundo lugar como exportador. A nivel nacional, Puebla es el segundo estado con mayor rentabilidad. Se ha demostrado que la aplicación de fertilizantes químicos duplica los rendimientos; sin embargo, su uso lleva a costos económicos y ambientales de producción elevados (Chávez *et al.,* 2020). La aplicación de agentes bioestimulantes como los ácidos húmicos y ácidos orgánicos promueve la

actividad microbiana, estimula el sistema radicular y actúa como promotores vegetales (Sindhu *et al.*, 2022). Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), a través de mecanismos como: fijación de nitrógeno, solubilización de fosfatos, producción de reguladores del crecimiento vegetal (fitohormonas) y la liberación de sustancias antibióticas, colonizan el sistema radical de las plantas, para lograr mayor absorción de nutrientes, agua y minerales (Licea *et al.,* 2020). Por lo tanto, en esta investigación se evaluó el efecto de la aplicación de bacterias tipo PGPR y de agentes bioestimulantes en el cultivo de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) para obtener una mayor producción.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fase de laboratorio: Se recolectó suelo de la parcela de San Cristóbal los Nava, Tepeaca, Puebla, para su análisis físico, químico para propósitos de fertilidad de acuerdo a la NOM 021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Además, se realizó un análisis microbiológico por diluciones seriadas y se sembraron en placas de Petri con medios de cultivo: agar de soja y tripticaseína para bacterias mesofílicas aeróbicas, agar Czapeck-Dox para actinomicetos y agar de papa-dextrosa para hongos. Los resultados se reportaron en Unidades Formadoras de Colonias por gramo de suelo (UFC g^{-1}). Se realizó una prueba de germinación de semillas previamente desinfectadas con hipoclorito de sodio (NaClO) al 3% y enjuagadas con solución de fosfatos 0.1 M y H_2O destilada estéril. Se colocaron 100 semillas en papel absorbente estéril humedecido en una placa de Petri, se mantuvieron a 25±2 °C y en oscuridad por cinco días. Se aplicaron tres tratamientos bacterianos con: 1) *Azospirillum brasilense*, 2) *Pseudomonas fluorescens* y 3) *Raoultella planticola* y un tratamiento control sin inocular (n=3) (Cuadro 1). Las cepas pertenecen al Laboratorio de Microbiología de Suelos "Dr. Jesús Caballero Mellado" del Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Se calculó el porcentaje de germinación = (semillas germinadas/sembradas) × 100.

Fase de Invernadero: Se inocularon 300 semillas de brócoli por inmersión en 10^8 UFCmL^1, según los tratamientos del Cuadro 2, durante 30 minutos. Posteriormente, se sembraron en charolas de germinación con sustrato estéril 1:1:1 (peat moss:agrolita:vermiculita). El fertilizante aplicado fue 140-60-00 (100%) y 70-30-00 (50%). Se aplicó riego durante 30 días y se trasplantaron cinco plántulas por tratamiento en macetas con 5 kg de suelo de San Cristóbal los Nava, Tepeaca, Puebla. Se realizó una segunda inoculación durante el trasplante con 10^8 UFC mL^{-1}. El tratamiento con fertilización química se aplicó por única vez directamente en el suelo, mientras que los tratamientos con bioestimulantes y bacterias se aplicaron cuatro veces vía foliar durante el desarrollo de hojas verdes, florete y maduración del florete. A los 90 días se midió la altura y la masa fresca.

Fase de campo: El experimento se llevó a cabo en San Cristóbal los Nava del municipio de Tepeaca, Puebla. Se realizó un diseño experimental por bloques aleatorios que consistió en 10 tratamientos con 5 repeticiones (Cuadro 3), distribuidos en parcelas de 3x9 m. Cada plántula de brócoli, previamente tratada, se sembró a una distancia de 30 cm. Se aplicó el riego a los 15 días y, en el día 30, se realizó la aplicación foliar a los tratamientos, a excepción del tratamiento control sin inocular. La aplicación de los tratamientos se

realizó de manera similar al experimento de invernadero. Los datos se analizaron mediante una prueba de varianza ANOVA y una comparación de medias Tukey ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis físico-químico del suelo reporta una textura franco arenosa, medianamente alcalino, con baja concentración de materia orgánica y nitrógeno total, con una concentración alta de Ca^{2+}, Mg^{2+} y P^{3-}, y una concentración media de K^{+}, CIC alta, de acuerdo con la NOM 021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).

Cuadro 1. Tratamientos y porcentaje de germinación por efecto de las PGPR en semillas de brócoli.

Tratamientos	Germinación %
Azospirillum brasilense (UAP-151 y UAP-154)	91.0 ±0.07 a
Pseudomonas fluorescens (BUAP- AM55 y BUAP-P16)	81.0±2.82 ab
Raoultella planticola KMT10	81.0 ± 0.07 ab
Control	72.0 ± 2.12 b

Media de 3 repeticiones ± desviación estándar. Letras iguales sin diferencias significativas ($p \leq 0.05$). Porcentaje de germinación = (semillas germinadas / sembradas) × 100.

El cultivo de brócoli se adapta a cualquier tipo de suelo y crece en un intervalo de pH de 6 a 7. Sin embargo, el suelo de la parcela de San Cristóbal los Nava, Tepeaca, Puebla, tiene un pH entre 8 y 8.5, los nutrientes como el S^{-2}, K^{+1}, Mg^{+2} son más asimilables para la planta, pero el N, P, Ca, Fe, B se absorben en menor medida (SAKATA, 2024).

Cuadro 2. Efecto de agentes bioestimulantes y biofertilizantes sobre la altura y masa fresca de la planta de brócoli en invernadero.

Tratamientos	Altura (cm)	Masa fresca (g)
Azospirillum brasilense (UAP-151 y UAP-154)	24.6±2.1b	56.8±5.8 b
Pseudomonas fluorescens (BUAP- AM55 y BUAP-P16)	26.4±2.4b	73.0±8.1 b
Raoultella planticola KMT10	23.8±1.5b	57.6±4.9 b
Mezcla bacteriana	25.2±2.6 b	65.2±8.2 b
Mezcla bacteriana + Ácidos húmicos	33.4±3.3 a	121.5±12.4 a
Mezcla bacteriana + Ácidos húmicos, macro y micronutrientes	24.6±1.5 b	61.6±8.3 b
Mezcla bacteriana + Ácidos Orgánicos	24.8±2.6b	73.0±11.2 b
Mezcla bacteriana + Fertilización 50%	25.2±1.5 b	67.2±8.7 b
Mezcla bacteriana + Fertilización 100%	25.8±1.5b	64.8±7.6 b
Control	23.4±1.8b	62.4±6.8 b

Mezcla bacteriana: *Azospirillum brasilense* (UAP-151 y UAP-154), *Pseudomonas fluorescens* (BUAP- AM55 y BUAP-P16) y *Raoultella planticola* KMT10. Fertilización: 140-60-00 (100%) y 70-30-00 (50%). Media de 5 repeticiones ± desviación estándar. Letras iguales sin diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

El análisis microbiológico del suelo indica que la concentración de bacterianas mesófilas fue de $5.5x10^6$ UFC g^{-1}, actinomicetos $2.3x10^5$ UFC g^{-1} y hongos 6.8 UFC g^{-1}. Estas concentraciones se consideran moderadamente bajas para bacterias y hongos, de acuerdo con Devi (2021), que afirma que en un gramo de suelo hay más de 10^9 UFC g^{-1}.

Evaluación de parámetros en el cultivo de brócoli en invernadero. El tratamiento con *Azospirillum brasilense* (UAP-151 y UAP-154) + *Pseudomonas fluorescens* (BUAP- AM55 y BUAP-P16) + *Raoultella planticola* KMT10 + ácidos húmicos favoreció el desarrollo de la planta, lo que se tradujo en un incremento de la altura y masa fresca de las plantas (Cuadro 2). La altura aumentó 42% respecto al control y la masa fresca en 94%. Se ha demostrado que la aplicación foliar de ácidos húmicos en hortalizas favorece el aumento en la altura de la planta, el diámetro del tallo y del florete, así como el contenido de nutrientes (de Moura *et al*., 2023). También se produce una mayor captación de nutrientes presentes en el suelo, debido a la capacidad de los ácidos húmicos para formar complejos metálicos (Tiwari *et al*., 2023). Estos actúan en conjunto con los microorganismos al intensificar la exudación radicular de ácidos orgánicos, que constituyen la fuente primaria de carbono para los microorganismos del en el suelo. Esto resulta en una relación simbiótica que estimula el sistema radicular y favorece la colonización de microorganismos benéficos (da Silva *et al*., 2021).

Cuadro 3. Efecto de agentes bioestimulantes y biofertilizantes sobre la altura, masa fresca, masa del florete y longitud de la raíz de la planta de brócoli en campo.

Tratamientos	Altura (cm)	Masa fresca	
		Planta (g)	Florete (g)
Azospirillum brasilense (UAP-151 y UAP-154)	51.0±5.6ab	1303.4±305.3ab	538.0±214.0ab
Pseudomonas fluorescens (BUAP-AM55 y BUAP-P16)	51.0±1.9ab	908.0±353.9bc	361.4±158.2ab
Raoultella planticola KMT10	51.0±3.8ab	1065.4±304.1abc	543.2±79.2 ab
Mezcla bacteriana	49.4±3.0ab	1130.4±125.8abc	347.2±180.9ab
Mezcla bacteriana+Ácidos Húmicos	50.0±5.4ab	1053.2±292.7abc	277.0±168.9ab
Mezcla bacteriana+Ácidos Húmicos, macro-micronutrientes	49.6±5.4ab	906.8±258.9bc	299.0±57.1ab
Mezcla bacteriana+Ácidos Orgánicos	53.6±2.5ab	1107.4±164.6b	523.4±321.7ab
Mezcla bacteriana+Fertilización 50%	56.4±1.8a	1372.4±192.0a	585.8±88.4a
Mezcla bacteriana+Fertilización 100%	54.6±2.1ab	1276.8±258.3abc	423.6±131.2ab
Control	48.0±3.64b	862.4±264.3c	253.0±219.8b

Mezcla bacteriana: *Azospirillum brasilense* (UAP-151 y UAP-154), *Pseudomonas fluorescens* (BUAP- AM55 y BUAP-P16) y *Raoultella planticola* KMT10. Fertilización: 140-60-00 (100%) y 70-30-00 (50%). Media de 5 repeticiones ± desviación estándar. Letras iguales sin diferencias significativas ($p \leq 0.05$).

Evaluación de parámetros en el cultivo de brócoli en campo. Se observó que al aplicar la mezcla de bacterias y fertilizante al 50%, la masa fresca de la planta aumentó a 1276.8 g y la del florete a 585.8 g, comparadas con sus controles 862.4 g y 253.0 g respectivamente (Cuadro 3). Los fertilizantes y los agentes biológicos (PGPR) pueden complementarse para favorecer la productividad de los cultivos (Licea-Herrera *et al*., 2020). Ollio y col. (2023), mencionan que la inoculación de semillas o superficies vegetales aumenta la colonización de la rizosfera. Esto mejora la disponibilidad de nutrientes, debido a que se presenta un incremento en las concentraciones de clorofila en plantas, permitiendo una mayor actividad fotosintética y producción de energía, resultando en un mayor crecimiento vegetativo y aumento de biomasa vegetal. Las PGPR como *A. brasilense, R.*

planticola y *P. fluorescens* desempeñaron un papel clave en el crecimiento del brócoli al aumentar la disponibilidad y concentración de nutrientes en la raíz.

CONCLUSIONES

La aplicación foliar de bioestimulantes, como los ácidos orgánicos, los ácidos húmicos y los nutrientes esenciales (macro y micronutrientes), junto con bacterias promotoras del crecimiento vegetal *Azospirillum brasilense* (UAP-151 y UAP-154), *Pseudomonas fluorescens* (BUAP- AM55 y BUAP-P16) y *Raoultella planticola* KMT10, mejoran los parámetros fenológicos de las plantas de brócoli (*Brassica oleracea var. Itálica*) y reducen la fertilización química, lo que contribuye a una agricultura sostenible, ecológica y estratégica clave para fortalecer la seguridad alimentaria de los productores.

AGRADECIMIENTOS

A BIOFERTIBUAP y a la VIEP por el apoyo económico y el respaldo necesario para llevar a cabo este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

Chávez-Díaz, I. F., Zelaya Molina, L. X., Cruz Cárdenas, C. I., Rojas Anaya, E., Ruíz Ramírez, S. & Santos Villalobos, S. D. L. (2020). Consideraciones sobre el uso de biofertilizantes como alternativa agro-biotecnológica sostenible para la seguridad alimentaria en México. *Revista mexicana de Ciencias Agrícolas,* 11(6), 1423-1436.

da Silva-Andrade, M.S.R., dos Santos-Silveira, M. S., da Silva-Andrade, C S.R., da Silva-Andrade C.S.R., Antunes- da Sousa, L. F., dos Santos, R. M., Santos-Barbosa, C. H., & Rigobelo, E. C. (2021). Humic substances in combination with plant growth-promoting bacteria as an alternative for sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 12, 719653.

de Moura-Telles O.V., Berbara-Louro R.L., Torchia-Oliveira, D.F., da Silva-Oliveira, H.F., van Tol de Castro, T.A., Tavares-Huertas, O.C, Rodrigues, N. F., Zonta, E., Santos-Azevedo, L., & Calderín-García, A. (2023). Humic foliar application as sustainable technology for improving the growth, yield, and abiotic stress protection of agricultural crops. A review. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *22*(8), 493-513.

Devi, N.B. (2021). Soil Microbial Biomass as an Index of Soil Quality and Fertility in Different Land Use Systems of Northeast India. In: Soni, R., Suyal, D.C., Bhargava, P., Goel, R. (eds) Microbiological Activity for Soil and Plant Health Management. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2922-8_4

Licea-Herrera, J.I., Quiroz-Velásquez, J.D.C. & Hernández-Mendoza, J.L. (2020). Impacto de *Azospirillum brasilense*, una Rizobacteria que estimula la producción del Ácido Indol-3-Acético como el mecanismo de mejora del crecimiento de las plantas en los cultivos agrícolas. *Revista Boliviana de Química*, 37 (1), 34-39.

Ollio, I., Santás-Miguel, V., Soto Gómez, D., Lloret, E., Sánchez-Navarro, V., Martínez-Martínez, S., Egea-Gilabert, C., Fernández, J. A., Fernández Calviño, D., & Zornoza, R. (2023). Effect of biofertilizers on broccoli yield and soil quality indicators. *Horticulturae,* 10(1), 42.

SAKATA, 2024. https://www.sakata.com.br/assets/downloads/299/sakata-manual-brocolis.pdf.

Sindhu, S.S., Sehrawat, A. & Glick, B. R. (2022). The involvement of organic acids in soil fertility, plant health and environment sustainability. *Archives of Microbiology*, *204*(12), 720.

Tiwari, J., Ramanathan, A. L., Bauddh, K. & Korstad, J. (2023). Humic substances: Structure, function and benefits for agroecosystems—A review. *Pedosphere,* 33(2), 237-249.

EFECTO DE MICORRIZAS EN EL CRECIMIENTO DE DOS ESPECIES DE *TAGETES* EN UN SUSTRATO ALTO EN FÓSFORO BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO

Victoria Apolinar Hidalgo[1], Ricardo Ceballos-Salazar[1], Evangelina Esmeralda Quiñones Aguilar[1]; Gabriel Rincón Enríquez[1]

[1] Laboratorio de Fitopatología, Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Camino Arenero 1227, El Bajío del Arenal, CP. 45019. Zapopan, Jalisco, México.

Correo del autor de correspondencia: riceballos_al@ciatej.edu.mx

RESUMEN

La flor de cempasúchil tiene una importancia en México debido a su uso durante las festividades conocidas como Día de Muertos a nivel nacional. Sin embargo, también tiene una alta relevancia en la industria alimentaria y farmacéutica debido a los fitocompuestos producidos por la planta, especialmente en la flor. Para este estudio, se utilizaron tres especies micorrízicas (*Funneliformis mosseae*, *Rhizophagus intraradices* y el Cerro del Metate) para medir el crecimiento de dos especies de *Tagetes*. Se utilizó un experimento factorial 2x4 donde el factor HMA fue inoculado al factor especie de cempasúchil para observar la interacción en la altura de la planta al término de 60 días. El análisis de suelo mostró una alta cantidad de fósforo en el sustrato utilizado. Además, las especies de *R. intraradices* y el Cerro del Metate demostraron un efecto significativo en el crecimiento de las especies de Tagetes mayor que el de F. mosseae, pero todas las especies de HMA teniendo mejores resultados que los controles. Este estudio demostró que los HMA pueden tener un impacto en el rendimiento de las plantas ornamentales y medicinales de la familia *Tagetes*, con el objetivo de mejorar estas áreas en el sector agrícola.

PALABRAS CLAVE: *Cempasúchil, hongos micorrízicos arbusculares, importancia agrícola, mejoramiento, producción agrícola.*

INTRODUCCIÓN

La flor de cempasúchil ha sido galardonada como una de las plantas mexicanas con mayor relevancia en la cultura del país por siglos. Es una planta ornamental que destaca por su brillante color y es usada principalmente durante las festividades del Día de Muertos, por lo que su producción anual es bastante importante en distintas regiones del territorio nacional (Serrato, 2022). Es por ello por lo que diversas estrategias han salido al mercado agrícola para mejorar su cultivo y cosecha, así como su salud ante la presencia de diversos factores bióticos y abióticos, siendo de las más sonadas el uso de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) en la última década (Atmaca, 2024). Estos hongos realizan simbiosis con sus huéspedes para que, a cambio de carbohidratos para su proliferación y metabolismo, le brinden a la planta de nutrientes, principalmente fósforo y nitrógeno, así como agua (Nadeem *et al.*, 2017; Birhane *et al.*, 2012). Es esta relación

comensalita la que hace que las plantas tengan una mejora en su crecimiento y biosíntesis de metabolitos secundarios y fitohormonas (Nadeem *et al.,* 2017; Birhane *et al.,* 2012; Liu *et al.,* 2012). Para poder determinar qué estrategia seguir y cuál es la más conveniente, en este trabajo el objetivo fue evaluar el efecto de tres especies de HMA en dos especies de *Tagetes* en condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del sustrato y material vegetal. El sustrato empleado estuvo constituido de las proporciones: 40% suelo, 55% arena y 5% agroperlita. Semillas de cempasúchil de las especies *Tagetes erecta* y *Tagetes terniflora* fueron puestas en charolas de germinación usando arena como único sustrato, y a los 15 días de su germinación, fueron trasplantadas a macetas conteniendo 2 kg del sustrato anteriormente mencionado previamente esterilizado (125°C, 1.0546 $kg.cm^{-2}$, 6 h). El suelo fue analizado por el Laboratorio de Análisis Agricultural Fertilab® en Celaya, Guanajuato (fertilab.com.mx) acorde a la NOM-021-RECNAT-2000 (2002) obteniendo cantidades altas de fósforo (P).

Inoculación de esporas de HMA y diseño experimental. Durante el trasplante, las raíces de las plántulas fueron inoculadas con 100 esporas de las especies de hongos micorrízicos arbusculares (HMA): *Funneliformis mosseae* (FM), *Rhizophagus intraradices* (Ri) y el consorcio Cerro del Metate (CM) (compuesto por *Acaulospora mellea, A. scrobiculata, Claroideoglomus etunicatum* y *Funneliformis geosporum*). Se realizó un experimento factorial 2X4 (8 tratamientos) completamente al azar; evaluando al factor HMA: 4 niveles (FM, Ri, CM, sin) y el factor especie de *Tagetes* (*T. erecta* y *T. terniflora*), cada tratamiento con 7 repeticiones. Se tuvieron 28 unidades experimentales (UE); cada UE fue una maceta con una planta de *Tegetes* spp., el experimento se mantuvo en condiciones de invernadero y se observó durante 60 días después de la inoculación, en los que se cuantificó la altura de la planta al final del experimento. Los datos se analizaron con un análisis de varianza y prueba de comparación múltiple de medias Tukey con un 95% de confianza usando el programa Statgraphics®.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El inóculo conocido como Cerro del Metate tuvo el mejor efecto significativo ($p \leq 0.05$) en el crecimiento para ambas especies vegetales de *Tagetes* (Figura 1). A pesar de existir una ligera diferencia significativa entre CM y Ri, contra Fm se demostró una diferencia del 24% y en plantas que no contuvieron HMA del 28%. Para la especie de *T. terniflora*, sólo demostró diferencia contra el control sin HMA del 36%. Con esto, se puede determinar que el inóculo de CM en general tuvo mejor efecto en la altura de planta.

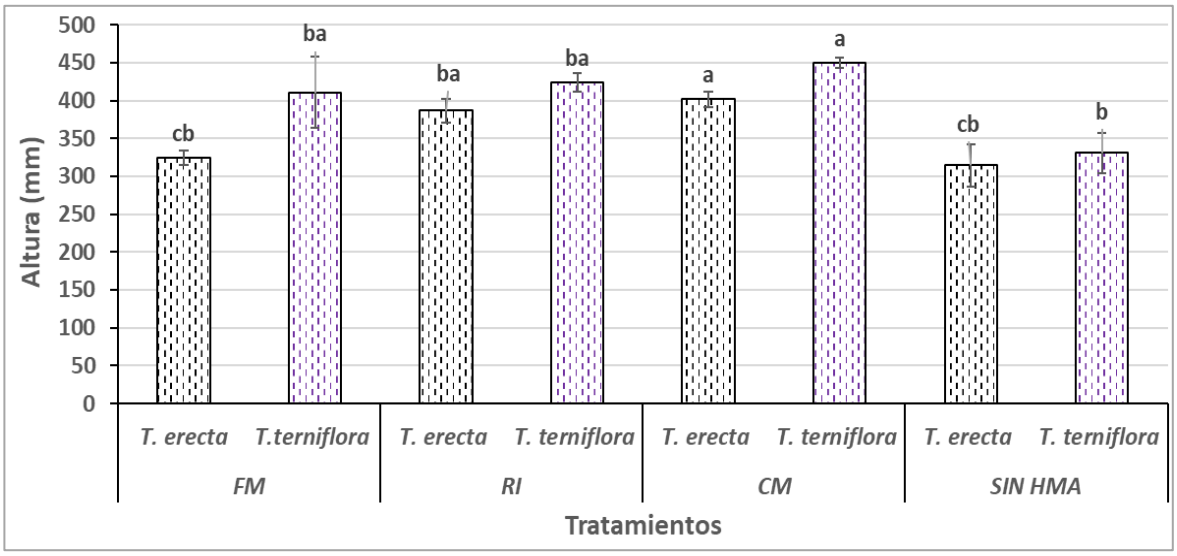


Figura 1. Efecto de especies micorrízicas en crecimiento de las especies de *Tagetes* después de los 60 días de establecido el experimento en condiciones de invernadero.

Líneas sobre las barras muestran el error estándar, letras distintas muestran diferencias significativas Tukey $p < 0.05$. FM= *Funneliformis mosseae*, RI= *Rhizaophagus intraradices*, CM=Cerro del Metate.

El inóculo del cerro del Metate se compone de 4 especies fúngicas micorrízicas, y este consorcio ha demostrado tener efectos significativos en el crecimiento de plantas de papaya (Ceballos *et al.,* 2022). Sin embargo, no se conoce a la fecha con certeza cuáles son las funciones de todas y cada una de las especies que le conforman y qué especie es la que tiene una mayor colonización en las raíces de cempasúchil.

Por otro lado, *Funneliformis mosseae* ha demostrado tener un impacto más significativo en otras especies vegetales (Ceballos *et al.,* 2022), sin embargo, para *T. erecta* en este experimento no se demostró lo antes mencionado. Esto puede deberse a la habilidad de la propia planta de cempasúchil para inhibir la proliferación de microorganismos en su rizosfera gracias a los fitocompuestos que produce y que son utilizados como bactericidas y fungicidas (Camacho *et al.,* 2019). Por otro lado, los hongos micorrízicos arbusculares tienden a colonizar a sus huéspedes al estar éstos bajo condiciones de estrés (Al-Karaki, 2000). Pero para determinar dichas condiciones, se requiere poner factores de estudio adicionales que permitan determinar un mejor efecto de este HMA.

Para este estudio, la especie micorrízica de *Rhizophagus intraradices* también fue utilizada y evaluada en el crecimiento de las especies de cempasúchil. Este HMA tuvo un impacto similar en ambas especies, superando únicamente a los controles que no tuvieron al HMA. Esta especie de Ri ha sido muy estudiada en el campo de la micorrizología debido a su fácil reproducción y facilidad de integrarse a los cultivos, lo cual dependerá de la especie a la que esté colonizando y ha mostrado gran capacidad de adaptación en suelos contaminados con metales pesados o una alta cantidad de minerales (Göhre *et al.,* 2006). Al ser un suelo rico en fósforo, esta especie de HMA tuvo un efecto importante para ambas especies de *Tagetes*, mejorando su crecimiento en comparación con los controles, demostrando la capacidad de proliferar incluso en suelos ricos en minerales,

en comparación con plantas inoculadas con esporas de HMA en suelos pobres de fósforo (Ceballos *et al*., 2023).

No obstante, observando los resultados obtenidos, se estima que tanto el consorcio del Cerro del Metate como *Rhizophagus intraradices* tienen un efecto importante en el crecimiento de planta de cempasúchil para las especies de *Tagetes erecta* y *T. terniflora*. Por lo que se pretende realizar más estudios para conocer el alcance que tienen estas especies micorrízicas en otras características de importancia para esta especie florícola.

CONCLUSIONES

La flor de cempasúchil, en sus dos especies trabajadas, tuvo un gran crecimiento al ser inoculada por los HMA de *R. intraradices* y el consorcio del Cerro del Metate. Esto indica que la simbiosis realizada por estos ejemplares tiene un gran potencial a futuro en el campo de la ornamentación, así como la medición en la producción de metabolitos con beneficio para el hombre.

BIBLIOGRAFÍA

Al-Karaki, G.N. (2000) Growth of mycorrhizal tomato and mineral acquisition under salt stress. Mycorrhiza 10:51– Birhane E, Sterck FJ, Fetene M *et al*. (2012) Arbuscular mycorrhizal fungi enhance photosynthesis, water use efficiency, and growth of frankincense seedlings under pulsed water availability conditions. *Oecología,* 169:895.

Camacho-Campos, C., Pérez-Hernández, Y., Valdivia-Ávila, A., Ramírez-Pérez, H. L. & Gómez-Brisuela, L. (2019). Propiedades fitoquímicas y antibacterianas de extractos de Tagetes erecta L. (Asteraceae). Revista Cubana de Química, 31(1), 53-64.

Ceballos-Salazar, R., Quiñones-Aguilar, E.E., López-Mena, E.R., Navarro-López, D.E. & Rincón-Enríquez, G. (2022). Efecto de nanopartículas de hierro y cerio en el crecimiento de papaya micorrizada en invernadero. In: R. Zetina Lezama, O.H. Tosquy Valle, M.V. Vázquez Hernández, A.L. del Angel-Pérez, V.A. Esqueda Esquivel y C. Perdomo Montes (comps). Investigaciones Científicas y Tecnológicas para la Seguridad Alimentaria Veracruz. INIFAP. ISSN: 2954-4351. p. 139-149.

Etmal, A. (2024). Comparison of the Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungal (AMF) Spore Inoculation on The Growth of Mexican Marigold (*Tagetes erecta* L.) Plants Grown wit Two Different Techniques. International Journal of Engineering and Science Invention (IJESI). DOI: 10.35629/6734-13100108.

Göhre, V. & Paszkowski, U. (2006) Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation. Planta 223, 1115–1122.

Liu T, Sheng M, Wang C.Y. *et al*. (2015). Impact of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth, water status, and photosynthesis of hybrid poplar under drought stress and recovery. *Photosynthetica,* 53:250-258.

Nadeem, S.M., Khan, M.Y., Waqas, M.R., Binyamin, R., Akhtar, S. & Zahir, Z.A. (2017). Arbuscular Mycorrhizas: An Overview. In: Wu, QS. (eds) Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4115-0_1.

Serrato-Cruz MÁ. (2022). Cultivation methods and cultural motives for growing "flor de muerto" (*Tagetes erecta* L.). *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*. https://doi.org/10.22231/asyd. v19i3.1339.

EFECTO DE *Funneliformis mosseae* EN DOS CONCENTRACIONES DE FÓSFORO EN EL CRECIMIENTO DE PAPAYA BAJO INVERNADERO

Ricardo Ceballos Salazar[1]; Evangelina Esmeralda Quiñones Aguilar[1]; Gabriel Rincón Enríquez[1]

[1] Laboratorio de Fitopatología, Biotecnología Vegetal, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Camino Arenero 1227, El Bajío del Arenal, CP. 45019. Zapopan, Jalisco, México.

Correo del autor de correspondencia: riceballos_al@ciatej.edu.mx

RESUMEN

El estudio del suelo es una herramienta útil en la agronomía cuyo objetivo es mejorar las condiciones para el crecimiento efectivo de plantas generadoras de alimento o que sean usadas en diversos procesos farmacológicos o alimenticios. Es por esto por lo que se recurre a diversas tecnologías que están presentes en la naturaleza cuya función es mantener el balance del ecosistema donde se encuentran. Los hongos micorrízicos arbusculares (HMA) son usados en la agricultura debido a su increíble capacidad de proveer de nutrientes a la mayoría de las plantas terrestres, así como de protección. Sin embargo, el crecimiento de una planta también se ve limitado por diversos factores abióticos como los suelos pobres en minerales y nutrientes. Se realizó un experimento factorial 2x2 donde se evaluó el efecto de *Funneliformis mosseae* en dos tipos de suelos, uno pobre de P (M-) y otro rico en P (M+) y se midió la altura de la planta al término de 60 días de evaluación. El crecimiento de las plantas de papaya en un suelo pobre de P (M-) con *F. mosseae* tuvo mayor diferencia que en un suelo rico de P (M+), indicando un efecto satisfactorio del HMA en este experimento.

PALABRAS CLAVE: sustrato, mezcla, hongo micorrízico *arbuscular*, crecimiento vegetal, suelo, nutrientes, macroelementos esenciales

INTRODUCCIÓN

El uso de hongos micorrízicos arbusculares (HMA) ha permitido que los cultivos y plantas en general tengan una mejor respuesta y mayor beneficio en distintos ambientes. Estos microorganismos realizan simbiosis por medio de un muy complejo sistema de colonización en las raíces de más del 90% de especies vegetales (Kokkoris *et al.,* 2020). Esta proliferación entre el HMA y las raíces es lo que le permite al hongo proporcionar a la planta nutrientes presentes en el suelo, principalmente fósforo y nitrógeno, así como agua, y a cambio, la planta produce carbohidratos que el hongo usa para su metabolismo (Nadeem *et al.,* 2017; Birhane *et al.,* 2012). Esta interacción entre HMA y la planta es muy sofisticada, donde también las condiciones del suelo y ambientales llegan a tener un gran impacto sobre todo en el crecimiento de las plantas, así como la bioprotección ante factores bióticos y abióticos (Al-Karaki, 2000). Por tanto, el objetivo en esta investigación fue determinar el efecto de *Funneliformis mosseae* bajo dos condiciones nutrimentales de suelos en plantas de papaya en invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características del sustrato. El sustrato empleado estuvo constituido de suelo y arena, los cuales fueron conseguidos en un vivero y usados en diferentes proporciones. Se tuvieron dos mezclas con diferentes proporciones de estos materiales. M1 (M-) para un sustrato con composición de 60% suelo, 30% arena y 10% agroperlita (60:30:10) y M2 (M+) con 40% suelo, 55% arena y 5% agroperlita (40:55:5). Ambas mezclas o sustratos fueron analizadas para determinar la cantidad de fósforo (P), nitrógeno (N) y potasio (K). El estudio fue realizado por el Laboratorio de Análisis Agricultural Fertilab® en Celaya, Guanajuato (fertilab.com.mx) acorde a la NOM-021-RECNAT-2000 (2002). Ambos sustratos se esterilizaron (125 °C, 1.0546 kg cm^{-2}, 6 h).

Material vegetal, inoculación de HMA y diseño experimental. Se utilizaron semillas de papaya obtenidas de un fruto fresco, limpiadas con agua destilada y puestas a germinar por 2 semanas en charolas de germinación. Las plántulas se trasplantaron a macetas conteniendo 2 kg de la mezcla de sustrato y al momento del trasplante se inocularon con 100 esporas de un inóculo previamente obtenido de macetas trampa de la especie micorrízica *Funneliformis mosseae* (*Glomus mosseae*), únicamente en plantas que llevaban al hongo, mientras que aquellas que no lo llevaban fueron los controles. El experimento se mantuvo por 60 días después de la inoculación y se fue midiendo la altura hasta el levantamiento del experimento. Los datos obtenidos se analizaron usando el programa Statgraphics® usando a Tukey con un 95% de confianza.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 muestra los resultados obtenidos de la altura de las plantas de papaya para los distintos tratamientos. El substrato con menor cantidad de fósforo (Fig. 2) obtuvo los mejores resultados en comparación con el substrato con mayor cantidad de fósforo (Fig. 2). Esto puede observarse al calcular la diferencia en porcentaje entre las plantas con *Funneliformis mosseae* y aquellas que no *tienen* HMA.

Para el caso de las plantas con sustrato pobre en fósforo (Figura 1), éstas obtuvieron una diferencia significativa entre plantas con HMA y plantas sin HMA del 313% en crecimiento, mientras que las que tenían una mayor cantidad de fósforo en el substrato fueron únicamente el 29%. La diferencia en el crecimiento vegetal entre tratamientos es de más de 10 veces, lo que indica un claro efecto del HMA para proveer de fósforo a la planta. De igual manera, se observa una diferencia entre tratamientos de plantas sin HMA de sustrato alto en P (M+) y pobre (M-) del 197%.

Como se observa en la Figura 2, la concentración de fósforo (P) para M+ en comparación con M- es de más del doble. De igual manera, se observó más del doble de cantidad de potasio (K) pero para el nitrógeno (N), se encontró en menor presencia, teniendo más del doble en M-. Estos tres macronutrientes han sido clasificados como los más importantes en el crecimiento y desarrollo de las plantas, teniendo todos y cada uno

roles importantes en su sostenimiento y metabolismo durante la fotosíntesis (Jiaying *et al.,* 2022; Bago *et al.,* 1998).

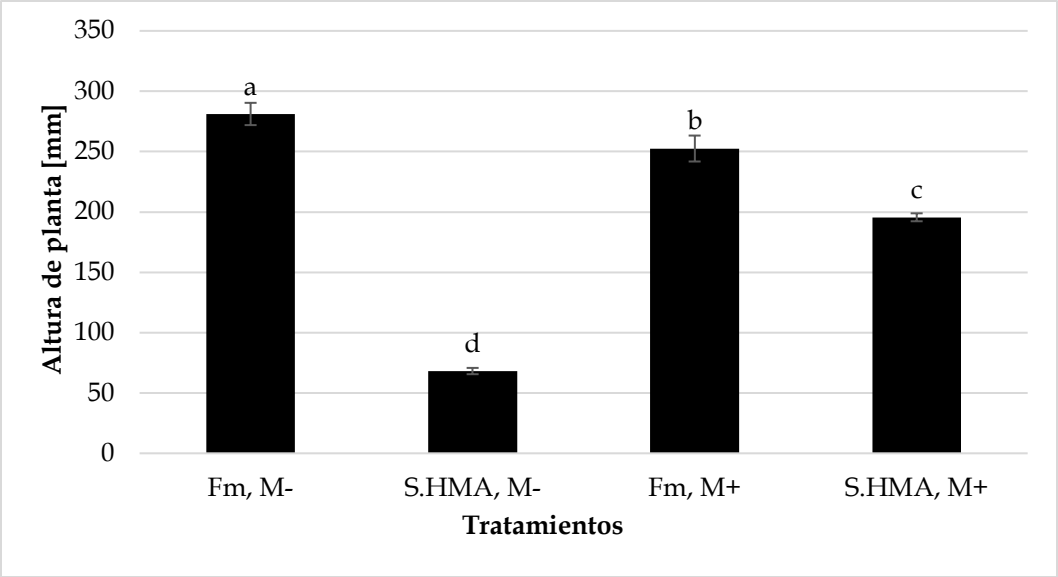


Figura 1. Efecto de *Funneliformis mosseae* al crecimiento de las plantas de papaya después de los 60 días de establecido el experimento en condiciones de invernadero.

Líneas sobre las barras muestran el error estándar, letras distintas muestran diferencias significativas Tukey p<0.05. M- = sustrato 1; M+ = sustrato 2; Fm = *Funneliformis mosseae*, S.HMA = sin hongos micorrízicos arbusculares.

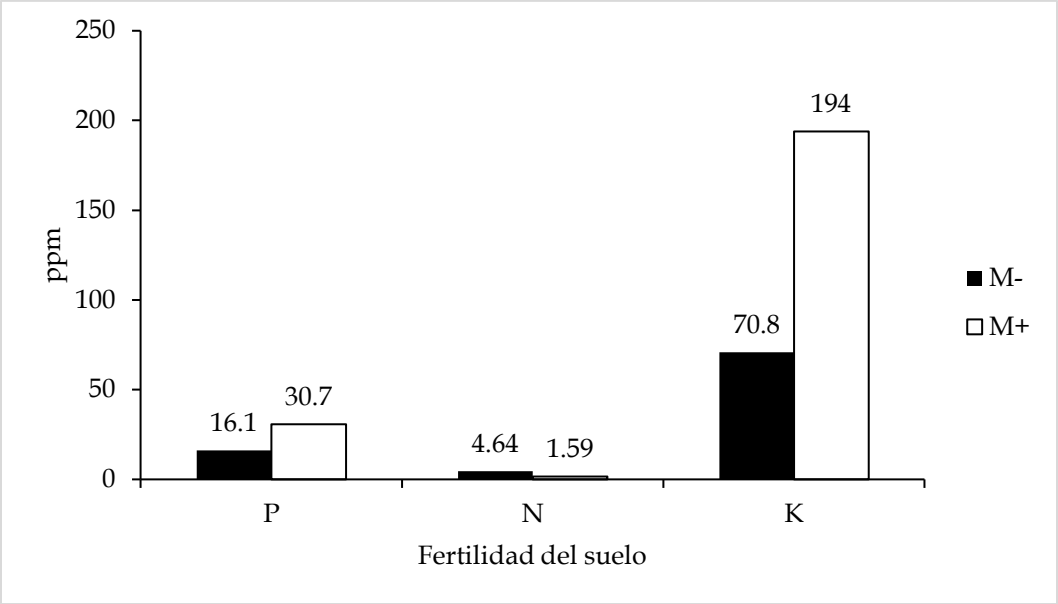


Figura 2. Análisis de macronutrientes para los suelos utilizados en el experimento. M-: sustrato con menor cantidad de P, M+: sustrato con mayor cantidad de P.

Por ejemplo, el fósforo es el más importante debido a que también forma parte como uno de los bloques primordiales de la estructura del ADN, aunado al nitrógeno, sin estos

no podría existir la biosíntesis de los ácidos nucleicos que ponen en marcha todo el mecanismo de las especies vegetales que va desde su crecimiento hasta la formación de metabolitos secundarios y otras hormonas que no sólo tienen impacto en la salud humana, sino también en el ambiente y en la protección ante factores bióticos y abióticos (Clavel *et al.,* 2020).

Adicionalmente, el fósforo tiene un rol crucial en la energía de las células en forma de ATP, la cual se utiliza para todos los procesos anteriormente mencionados (Bago *et al.,* 1998). Por otro lado, el potasio funge como principal regulador de todos los cationes en cualquier proceso metabólico, en este caso de la planta al controlar el flujo de agua, así como compuestos orgánicos provenientes tanto del suelo como de la biosíntesis (Khan *et al.,* 2023).

Hablando del HMA, se sabe que estos proveen a la planta de beneficios ante factores bióticos y abióticos [Clavel et al., 2020] y además proveen de nutrientes a la planta para mejorar su crecimiento y metabolismo, especialmente bajo condiciones de estrés (Al-Karaki, 2000). Esto convierte a los HMA en una herramienta muy útil para utilizar en cultivos de carácter agrícola.

En este caso, se observa un mejor efecto en el crecimiento en plantas con HMA para ambos casos en comparación con sus controles sin HMA (Figura 1). Sin embargo, la diferencia en la composición de substrato es grande. Para M- se observó una mayor altura en plantas con HMA que en plantas con más P (M+), lo que indica que el HMA está implicado en el efecto del crecimiento de las plantas de papaya. Clavel *et al.* (2020) mencionan que los HMA tienen un mejor efecto cuando se encuentran en condiciones de estrés para la planta, ya que esto conlleva que el hongo coloniza mejor, lo que a su vez le provee a la planta de los nutrientes necesarios para crecer. Esto concuerda con un estudio de Khan *et al.* (2023), que indica que las plantas tienen una alta preferencia hacia suelos ricos en fósforo, en este caso en M+, lo que indica que el HMA muy posiblemente no haya logrado una colonización efectiva al tener la planta disponibilidad de nutrientes en el sustrato. Sin embargo, se requeriría realizar un estudio de porcentaje de colonización para entender el comportamiento del hongo ante estas condiciones.

Por otro lado, la composición del suelo también tiene que ver con el desarrollo de la planta (Harper, 2024) y para este experimento no fue diferente. El sustrato con bajo P (M-) se encuentra a una proporción de 60:30:10 en comparación con alto P (M+) donde es 40:55:5 como se menciona en la metodología. Ambos sustratos se clasificaron como franco arenoso y franco arcillo arenoso respectivamente acorde a la NOM-021-RECNAT-2000. Lo cual, a pesar de tener menor cantidad de suelo para M+, la cantidad de P en la mezcla fue mucho mayor que en M-. Esto puede deberse a que la zona de donde proviene el suelo es rica en fósforo.

CONCLUSIONES

Existe un claro efecto por parte del HMA en suelos pobres de fósforo para que pueda más fácilmente colonizar a la planta y brindarle los nutrientes que requiere al facilitarle el acceso y alcance en suelos pobres de nutrientes.

BIBILIOGRAFÍA

Al-Karaki, G.N. (2000). Growth of mycorrhizal tomato and mineral acquisition under salt stress. Mycorrhiza 10:51–54.

Birhane E, Sterck FJ, Fetene M et al. (2012) Arbuscular mycorrhizal fungi enhance photosynthesis, water use efficiency, and growth of frankincense seedlings under pulsed water availability conditions. Oecologia 169:895–904.

Clavel, J., Lembrechts, J., Alexander, J., Haider, S., Lenoir, J., Milbau, A., NuÃ±ez, M., Pauchard, A., Nijs, I. & Verbruggen, E. (2020). The role of arbuscular mycorrhizal fungi in non-native plant invasion along mountain roads. New Phytologist.

Khan, F., Siddique, A.B., Shabala, S., Zhou, M., Zhao, C. (2023). Phosphorus Plays Key Roles in Regulating Plants' Physiological Responses to Abiotic Stresses. Plants, 3;12(15):2861. doi: 10.3390/plants12152861

Kokkoris, V., Stefani, GLOMUS, Dalpe, Y., Dettman, J., and Corradi, N., 2020. Nuclear dynamics in the arbuscular mycorrhizal fungi. Trends in Plant Science. S1360138520301680–. doi:10.1016/j.tplants.2020.05.002.

Ma Jiaying, Chen Tingting, Lin Jie, Fu Weimeng, Feng Baohua, Li Guangyan, Li Hubo, Li Juncai, Wu Zhihai, Tao Longxing, Fu Guanfu, Functions of Nitrogen, Phosphorus, and Potassium in Energy Status and Their Influences on Rice Growth and Development, Rice Science, Volume 29, Issue 2, 2022, Pages 166-178, ISSN 1672-6308, https://doi.org/10.1016/j.rsci.2022.01.005.

Nadeem, S.M., Khan, M.Y., Waqas, M.R., Binyamin, R., Akhtar, S., Zahir, Z.A. (2017). Arbuscular Mycorrhizas: An Overview. In: Wu, QS. (eds) Arbuscular Mycorrhizas and Stress Tolerance of Plants. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4115-0_1

Olivia, Harper. (2024). Assessing the Influence of Soil Composition on Plant Growth and Development in USA. *American Journal of Physical Sciences*, 2. 61-72. 10.47604/ajps.2665.

CONCENTRACIONES DE PESTICIDAS EN SUELOS AGRÍCOLAS DEL SUR DE GUANAJUATO

Víctor Manuel Montoya Jasso[1]; Jesús Manuel Arreola Tostado[2]; Roberto Reynoso Santos[3]

[1]Colegio de Postgraduados. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco. 56264. Estado de México, México.
[2]Consultor agrícola. Calle Apaseo el Grande 114, Colonia Guanajuato, Celaya. 38010. Guanajuato, México.
[2]Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Centro de Chiapas, km 3, Carretera Ocozocoautla-Cintalapa, 29149. Chiapas, México.

Correo del autor de correspondencia: montoya.victor@colpos.mx

RESUMEN

El uso intensivo de pesticidas en sistemas agrícolas convencionales ha contribuido al incremento de residuos persistentes en el suelo, con implicaciones ambientales y sanitarias relevantes. En este contexto, se evaluaron las concentraciones de pesticidas en suelos agrícolas del municipio de Acámbaro, Guanajuato, México, con más de 30 años de manejo convencional. El objetivo del estudio fue identificar y cuantificar los pesticidas presentes en estos suelos, considerando sus propiedades físico-químicas y su potencial de adsorción. Se muestrearon 130 hectáreas durante noviembre y diciembre del 2024, utilizando estimadores de razón bajo muestreo simple aleatorio, obteniendo 69 muestras compuestas (0-15 cm de profundidad), analizadas mediante cromatografía de gases. Se detectaron 11 pesticidas: cuatro herbicidas, cuatro fungicidas y tres insecticidas. Los compuestos más frecuentes fueron el herbicida 2-4 D y el fungicida Epoxiconazol, ambos presentes en el 11.59% de las muestras, con concentraciones de hasta 0.21 y 0.24 mg kg^{-1}, respectivamente. En contraste, los pesticidas de menor presencia fueron Glifosato (5.80%), Carbamato (7.25%) y Dimetilamina (7.25%), con concentraciones entre 0.03 y 0.21 mg kg^{-1}. La persistencia de estos compuestos se relaciona con las características de los vertisoles locales (pH ácido, arcillas tipo montmorillonita), lo que favorece su adsorción y acumulación. Los resultados evidencian un riesgo potencial para la salud del suelo, la calidad del agua y la seguridad alimentaria, subrayando la necesidad de fortalecer la regulación del uso de pesticidas en la agricultura mexicana.

PALABRAS CLAVE: *Agricultura convencional; ingrediente activo; residualidad; salud del suelo.*

INTRODUCCIÓN

La agricultura moderna debe gran parte de su potencial al empleo de productos sintéticos que ofrezcan un impacto más atractivo en la productividad de los cultivos, tales como el uso de fertilizantes, variedades tolerantes y/o resistentes al ataque de plagas y enfermedades, control de malezas, etc. No obstante, el uso desmedido de algunos productos puede provocar efectos negativos en los cultivos como en la salud del

consumidor final. Actualmente, uno de los productos más empleados son los pesticidas, principalmente herbicidas y fungicidas (Zhang *et al*., 2018), los cuales tienen compuestos que les confieren una mayor permanencia en el suelo que, con influencia de factores ambientales, propicia la infiltración de las moléculas a aguas subterráneas (Yang *et al.,* 2025).

Aunque el comportamiento y permanencia de los pesticidas varían según su composición, existen características edáficas que incrementan el grado de adsorción: arcillas de tipo montmorillonita (Wisniewska *et al.,* 2018), suelos con pH menor a 5 y ácidos orgánicos de bajo peso molecular (Zhu *et al.,* 2021), por mencionar algunos. A su vez, los componentes minerales del suelo tienen impacto en la interacción de pesticidas, por ejemplo, la presencia de caolinita, o su empleo como mejorador de suelo, intensifica la adsorción de moléculas contaminantes (Tong-Fang *et al.,* 2023). En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo identificar y cuantificar los pesticidas presentes en suelos agrícolas con manejo convencional en el sur de Guanajuato, México, con el fin de evaluar su residualidad y potencial impacto ambiental.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante los meses de noviembre/diciembre del 2024, en el municipio de Acámbaro, Guanajuato, México; abarcando un total de 130 hectáreas con antecedentes de producción de granos durante más de 30 años. Para garantizar la representatividad estadística del estudio, se aplicó un muestreo simple aleatorio utilizando estimadores de razón (Ecuaciones 1 a 4), lo que permitió calcular un tamaño de muestra óptimo. Se obtuvieron 69 muestras compuestas, cada una integrada por cinco submuestras recolectadas en un radio de 2 metros. La profundidad de muestreo fue de 0-15 cm.

$$Ec.1 \quad r = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{\sum_{i=1}^{n} x_i}$$

Donde: r: estimador de razón, y_i: sumatoria de la muestra y, x_i: sumatoria de x del muestreo piloto.

$$Ec.2 \quad {S^2}_r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - r x_i)^2}{n-1}$$

Donde: ${S^2}_r$: varianza muestral de la razón, n: número de observaciones en la muestra.

$$Ec.3 \quad D = \frac{B^2 {\mu^2}_x}{4}$$

Donde: D: varianza de la media, B: error de muestreo aceptado (0.05), μ^2: media de la muestra x del muestreo piloto.

$$Ec.4 \quad n = \frac{N {S^2}_r}{ND + {S^2}_r}$$

Donde: n: tamaño de muestra, N: número total de unidades de muestreo, $S^2{}_r$: varianza muestral de la razón, D: varianza de la media.

La determinación de pesticidas se realizó en los Laboratorios Woods End ubicados en Augusta, Maine, EUA; empleando cromatografía de gases mediante la metodología descrita por la AOAC (2023). Este procedimiento permitió identificar y cuantificar la presencia de ingredientes activos en cada muestra, clasificándolos por tipo de pesticida (herbicida, fungicida, insecticida) y por concentración.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del total de 69 muestras, se encontró la presencia de 11 pesticidas: tres insecticidas, cuatro herbicidas y cuatro fungicidas (Figura 1). La mayor concentración media reportada correspondió al fungicida con i.a. Boscalid, seguido del herbicida con i.a. 2-4 D, ambos con un valor medio de 0.15 mg kg^{-1}. En el caso de los pesticidas con menor concentración media reportada se encuentran el glifosato (0.06 mg kg^{-1}), imidacloprid y azoxystrobin con 0.07 mg kg^{-1}.

Knuth *et al.* (2024) evaluaron la presencia de residuos de pesticidas en suelos agrícolas orgánicos y convencionales en Europa; encontraron que el 26% de los suelos presentaban moléculas de Azoxystrobin, Epoxiconazol, Tebuconazol, Metolaclor y Carbendazin. Cabe destacar que Metolaclor y Carbendazin fueron prohibidos para su uso en la Unión Europea en 2003 y 2014, respectivamente, debido a su toxicidad y persistencia ambiental. En contraste, en México, el único pesticida identificado en este estudio que cuenta con restricción oficial —aunque no prohibición— es el glifosato (Consejo Nacional Agropecuario, 2023). A pesar de su clasificación como ingrediente altamente peligroso, la Comisión Federal para la Protección de Riesgos Sanitarios, en el 2023 autorizó el uso de formulaciones comerciales con activos altamente peligrosos como el 2-4 D, Clorpirifos e Imidacloprid, entre otros.

Han *et al*. (2017) y Schleiffer y Speiser (2022) documentaron la presencia de residuos de pesticidas agrícolas en subproductos de granos y frutos secos incluso cuando han sido manufacturados dos años atrás. Esta persistencia evidencia los efectos del uso excesivo de pesticidas en sistemas agrícolas convencionales, presentando umbrales extremos en la adsorción de moléculas en las partículas del suelo (Li *et al.,* 2021) al limitar la incorporación de fuentes orgánicas de fácil mineralización (Tong-Fang *et al.,* 2023).

Destaca la presencia del herbicida 2-4 D y del fungicida Epoxiconazol, ambos presentes en el 11.59% del total de suelos evaluados. De igual manera, se encontró que solo en 5.80% de los suelos evaluados reportaron la presencia de moléculas de glifosato (Figura 2).

Estos resultados, representados en la Figura 2, reflejan el predominio de herbicidas y fungicidas en suelos con más de tres décadas de manejo convencional, lo que evidencia una acumulación persistente de ingredientes activos altamente peligrosos y plantea implicaciones relevantes para la salud del suelo y la seguridad agroalimentaria.

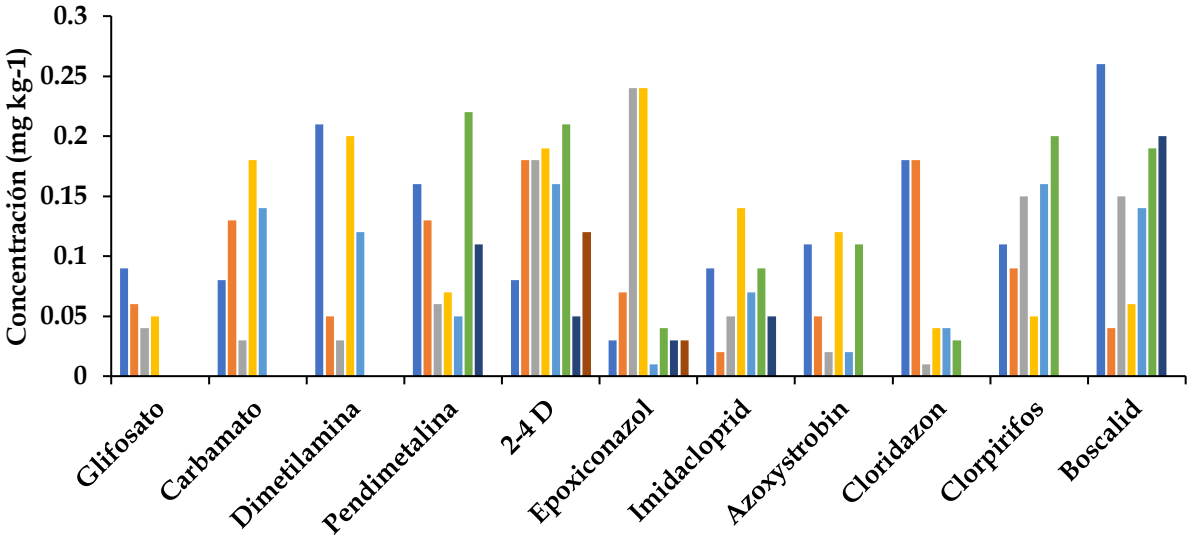


Figura 1. Concentración de pesticidas en suelos agrícolas de Acámbaro, Guanajuato, México.

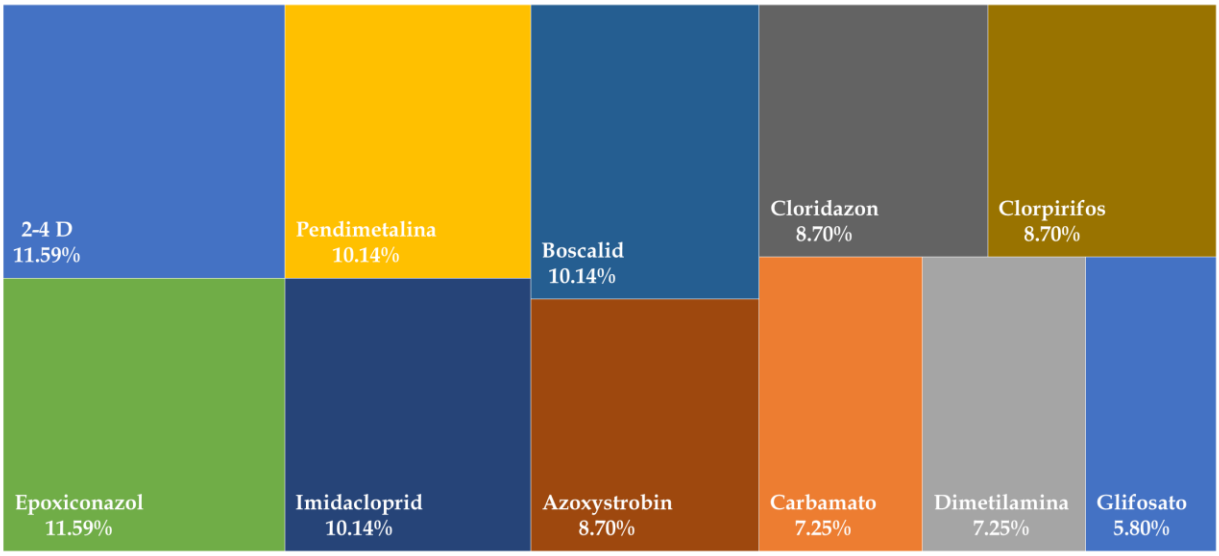


Figura 2. Incidencia de pesticidas en suelos agrícolas de Acámbaro, Guanajuato, México.

Los suelos evaluados presentan un historial de manejo agrícola convencional superior a 30 años. Aunque algunos lotes incorporan residuos orgánicos derivados de la cosecha, este es el único componente con enfoque orgánico identificado en la superficie muestreada. A pesar de que los porcentajes de detección de Glifosato, Clorpirifos y Carbamato fueron inferiores al 8.70%, su presencia en suelos con larga trayectoria de uso intensivo evidencia la persistencia de ingredientes activos altamente peligrosos. Estos hallazgos subrayan la necesidad urgente de establecer normativas más rigurosas y con

mayor capacidad de aplicación, especialmente en lo referente a la comercialización y uso de pesticidas en sistemas agrícolas convencionales.

CONCLUSIONES

Los pesticidas más frecuentes en el suelo corresponden al grupo de herbicidas y fungicidas, ambos están relacionados al uso desmedido y a la naturaleza propia de los suelos del sur de Guanajuato (vertisoles), lo que incrementa la permanencia de pesticidas, representando un foco importante de contaminación de cuerpos de agua, alimentos y medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

AOAC. (2023). Official Methods of Analysis, 22nd Edition. New York, Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/9780197610145.001.0001.

Han, Y., Mo, R., Yuan, X., Zhong, D., Tang, F., Ye, C. & Liu, Y. (2017). Pesticide residues in nut-planted soils of China and their relationship between nut/soil. *Chemosphere,* 180: 42-47. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.138.

Knuth, L. Gai, V. Silva, P. Harkes, J. Hofman, M. Šudoma, Z. Bílková, A. Alaoui, D. Mandrioli, I. Pasković, M. Polić, I. Baldi, M. Bureau, F. Alcon, J. Contreras, M. Glavan, N. Abrantes, I. Campos, T. Norgaard, E. Huerta, P.T.J. Schee pers, C.J. Ritsema, V. Geissen. (2024). Pesticide residues in organic and conventional agricultural soils across Europe: measured and predicted concentrations. *Environ. Sci. Technol.,* 58 (15): 6744-6752. https://doi.org/10.1021/acs.est.3c09059.

Li, H., Wang, F., Li, J., Deng, S. & Zhang, S. (2021). Adsorption of three pesticides on polyethylene microplastics in aqueous solutions: Kinetics, isotherms, thermodynamics, and molecular dynamics simulation. *Chemosphere,* 264: 128556. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128556.

Schleiffer. M. & Speiser. B. (2022). Presence of pesticides in the environment, transition into organic food, and implications for quality assurance along the European organic food chain – A review. *Environmental Pollution*, 313: 120116. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120116.

Tong-Fang, J., Da-Xia, Z., Yao-Zhong, Z., Jin, Y., Xian-Zheng, H., Mu, W., Bei-Xing L. & Liu, F. (2023). Adsorption behaviour and mechanism of Avermectin-based pesticides in soil driven by H-bonds formed between the compounds and humus. *Chemical Engineering Journal,* 459: 141647. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141647.

Wisniewska, M., Fijalkowska, G. & Szewczuk-Karpisz, K. (2018). The mechanism of anionic polyacrylamide adsorption on the montmorillonite surface in the presence of Cr (VI) ions. *Chemosphere,* 211: 524-534. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.198.

Yang, J., Chen, A., Zhu, S., Shang, C., Yang, Z., Cao, L. & Bai, M. (2025). Adsorption behavior of neonicotinoid pesticides on typical soil minerals. *Journal of Environmental Chemical Engineering,* 13(3): 116939. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116939.

Zhang, P., Ren, C., Sun, H. & Min, L. (2018). Sorption, desorption and degradation of neonicotinoids in four agricultural soils and their effects on soil microorganisms. *Science of the Total Environmental,* 615: 59-69. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.097.

PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN SUELOS FUERTEMENTE ALCALINOS EN SANTIAGO DE ANAYA, HIDALGO

Brenda Ponce Lira[1]; Héctor Oscar Orozco Gregorio[1]; Prisciliano Hernández Martínez[1]

[1] Universidad Politécnica de Francisco I. Madero. Carretera Tepatepec-San Juan Tepa, Km. 2, Hgo., C.P.42660. Tepatepec, Hidalgo; México.

Correo del autor de correspondencia: bponce@upfim.edu.mx

RESUMEN

México es el séptimo productor de maíz a nivel mundial y el cultivo representa una parte crucial de la producción nacional de granos; sin embargo, una limitante en la actualidad ha sido la alcalinidad de los suelos para su producción, aunado a lo anterior, el presente proyecto evaluó la producción de grano de maíz blanco, amarillo y azul de ciclo intermedio precoz para la adopción del mismo en suelos fuertemente alcalinos del alto Mezquital, Hidalgo. Mediante un diseño de DBCA se evaluó la altura de planta, el rendimiento de grano y el costo de producción de seis híbridos comerciales. Finalmente, se evidencia al maíz amarillo U2GA con mayor adaptabilidad a los suelos fuertemente alcalinos (7998.0 Kg ha^{-1}), seguido de maíz azul Mä Hai (5049.0 Kg ha^{-1}) y en última propuesta al establecimiento de maíz blanco U1G (3749.0 Kg ha^{-1}), AZ20 (3596.0 Kg ha^{-1}), U10G (1871.0 Kg ha^{-1}) y U5G (1842.0 Kg ha^{-1}) en la región del alto Mezquital, Hidalgo.

PALABRAS CLAVE: *Alcalinidad; híbridos de maíz; valle del Mezquital; Zea mays L.*

INTRODUCCIÓN

En el año 2023 y 2024, México cosechó 5,198,610.71 y 5,012,433.91 toneladas de grano de maíz en los años respectivos Con base a el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), se estableció 20 millones, 594,000 toneladas de grano blanco y 2 millones 922,000 de amarillo, mientras que las compras al extranjero fueron de entre 23 millones 600,000 toneladas y 24 millones de toneladas (SADER, 2024). Lo anterior denota la complejidad al producir menos grano y exportar y demandar más, pese a los problemas de alcalinidad de suelos por los que enfrentan diversos lugares (Olivas *et al.,* 2024; Delgado *et al.,* 2022; Bello *et al.,* 2001) que en consecuencia han disminuido la fertilidad del suelo y mermado el rendimiento de los cultivos, propiciando pérdidas económicas

Por lo anterior, en el presente análisis se está considerando evaluar el rendimiento de grano de maíz blanco, amarillo y azul de ciclo intermedio precoz para la adopción del mismo en suelos fuertemente alcalinos del Valle del Mezquital, Hidalgo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización de la zona de estudio. El municipio de Santiago de Anaya se localiza dentro de la zona del alto Valle del Mezquital; Hidalgo. Se tomaron como áreas de estudio parcelas experimentales de los ejidos de Vicente Guerrero y el Palomo ubicado en

Actopan; al establecer una densidad de siembra de 80 mil semillas por hectárea (Ver Cuadro 1).

Cuadro 1. Ubicación geográfica de los predios experimentales.

Coordenadas de ubicación del predio		msnm	Domicilio
20.364040	-99.007060	1952	Vicente Guerrero; Santiago de Anaya, CP. 42621 Hgo.México.
20.36380,	-99.008590	1948	Vicente Guerrero; Santiago de Anaya, CP. 42621 Hgo.México.
20.363322	-99.007544	1950	Vicente Guerrero Santiago de Anaya, CP. 42621 Hgo.México.
20.362468	-99.007949	1946	Vicente Guerrero; Santiago de Anaya, CP. 42621 Hgo.México.
20.363354	-99.006849	1951	Vicente Guerrero; Santiago de Anaya, CP. 42621 Hgo.México.
20.248009	-98.945357	2000	El Palomo, Actopan; Hidalgo México.

Características promedio de los predios. Las características fisicoquímicas de los predios experimentales se presentan en el Cuadro 2 con base en la NOM-021-RECNAT-2002 (DOF, 2002).

Cuadro 2. pH de los híbridos establecidos.

Híbrido	pH
U10G	8.7
U1G	8.5
U5G	8.7
AZ20	8.6
U2GA	8.6
Mä Hai	8.3

El tipo de suelo en los valles altos del municipio de Santiago de Anaya es Franco arenoso, con una precipitación anual promedio de 50 mm y clima semiseco. Su principal producción agrícola es la producción de maíz con una cosecha de 2,410 has (SIAP, 2023).

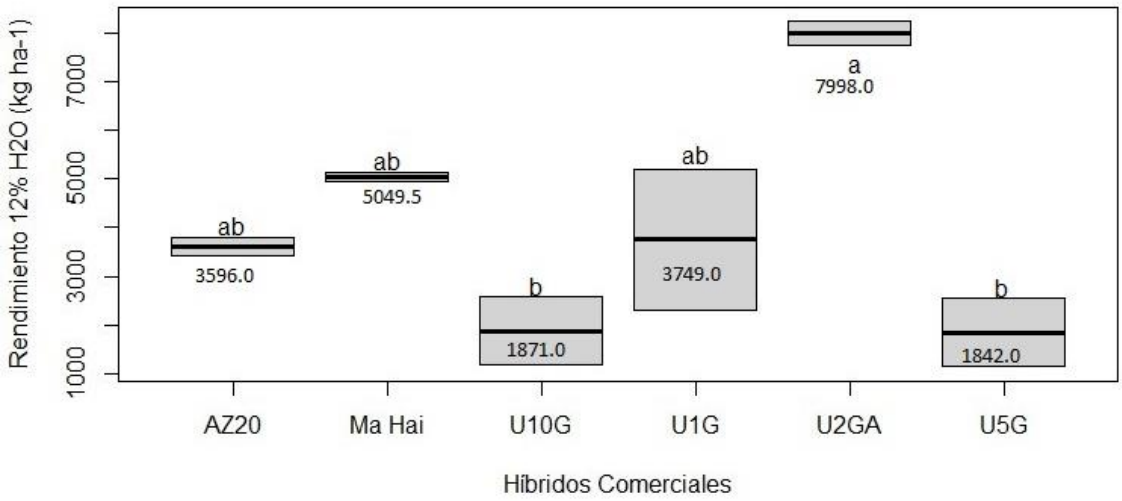
El muestreo de grano y cálculo de rendimiento de grano se realizó mediante el "Manual de determinación de rendimiento" (Verhulst, Sayre y Govaerts, 2012).

Diseño experimental. Se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar con dos repeticiones. Los datos obtenidos fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) para cada hibrido comercial, de manera individual y combinada, usando R Core Team versión 2024. Todos los parámetros fueron probados por significancia entre híbridos ($p \leq 0.05$). Cuando se encontraron diferencias significativas, se utilizó la diferencia mínima significativa honesta (DMSH) para determinar la diferencia entre medias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 1 demuestra que el análisis de varianza detectó diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$) en el rendimiento de los híbridos evaluados. En primer lugar, el maíz amarillo U2GA se caracterizó por tener tolerancia a sequia siendo éste un factor importante para los ciclos de estiaje que se presentan cada vez más continuos. Además,

dicho genotipo se adaptó al suelo con clase textural franco arenoso el cual se reconoce por una baja retención de agua (Pino-Silvera, 2023). Es importante mencionar que el doble anclaje de dicho hibrido permitió suprimir el acame, sin duda alguna el doble propósito del híbrido evaluado, lo posiciona como primera opción para establecer en regiones



fuertemente alcalinas.

Figura 1. Rendimiento de grano de maíz al 12% de humedad.

A pesar de que estadísticamente AZ20, U10G, U1G y Mä Hai son iguales (Tukey, $p \leq 0.05$); éste último híbrido fue establecido en un suelo medianamente alcalino (con base a la NOM-021- RECNAT-2000) y ocupa el segundo lugar en rendimientos de granos; Mä Hai permite valorar el aprovechamiento de antocianinas las cuales con base a estudios previos funcionan como antioxidantes y antiinflamatorias con diversos beneficios en la salud (Arellano *et al.,* 2021; Xochipa *et al.,* 2021). El genotipo se adaptó medianamente al pH, el oxígeno, la luz y la presencia de iones metálicos (Ca^{2+}) presentes en el sistema agrícola como lo menciona (García-Gómez, 2022) de tal manera que en el Altiplano Central de México se siembran 150 mil hectáreas en altitudes de hasta 2800 msnm.

Debido a que la meta de cualquier agricultor es obtener altos rendimientos de su maíz; resulta menos conveniente establecer maíces de grano blanco (U1G, AZ20, U10G y U5G) en suelos fuertemente alcalinos debido a que numéricamente reportaron los rendimientos más bajos. Derivado de ello, es fundamental considerar la densidad de siembra como un factor manipulable por el agricultor que garanticen el desarrollo y alto rendimiento (Caviedes *et al.,* 2020). Finalmente, resulta claro la promoción, la adopción y adaptación del híbrido de maíz más rentable como alternativa de autoconsumo y negocio para los productores locales con base a la demanda o precio del mercado.

CONCLUSIONES

Fue interesante evidenciar al maíz amarillo (U2GA) presenta mayor adaptabilidad a los suelos fuertemente alcalinos al reportar mayor rendimiento de grano (7998.0 kg ha^{-1}).

Con base a los resultados obtenidos se sugiere evitar el establecimiento de maíces blancos en la región, los cuales reportaron menor rendimiento grano. Así mismo, se propone establecer los materiales genéticos en su máxima densidad de siembra recomendada y efectuar la caracterización nutrimental correspondiente para conocer la funcionalidad de cada genotipo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración de las empresas: AGROINSUMOS CENTÉOTL; AGROBAR/ESAI; PRODUCTORA DE SEMILLAS AZTECA, S.P.R. DE R.L y TECNOAGRO TIERRA-FÉRTIL S DE RL DE CV. Así como a productores potenciales y personal de campo, por las facilidades para el fortalecimiento de este proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

Arellano Vázquez, J. L., Herrera Zamora, A., Gutiérrez Hernández, G. F., Ceja Torres, L. F. & Flores Gómez, E. (2021). Color, contenido de antocianinas y dimensiones de semilla en líneas endogámicas de maíz azul y sus cruzas. *Idesia* (Arica), 39(3), 75-82. https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v39n3/0718-3429-idesia-39-03-75.pdf.

Bello, R.R., Cajuste, L.J., Román, D.F. & Calderón, N.E.G. (2001). Metales pesados, sales y sodio en los suelos de chinampa en México. *Agrociencia*, 35(4), 385-395. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30235402.

Caviedes, M., Carvajal-Larenas, F.E. & Zambrano, J.L. (2020). Tecnologías para el cultivo de maíz (*Zea mays*. L) en el Ecuador. *ACI* Avances En*: Ciencias e Ingenierías* (1). https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2588.

Delgado-González, C.R., Rodríguez-Laguna, R., Capulín-Grande, J., Madariaga-Navarrete, A. & Islas-Pelcastre, M. (2022). Caracterización fisicoquímica de suelos salinos agrícolas, en la localidad de Chicavasco, estado de Hidalgo, México: Physicochemical characterization of saline agricultural soils in the town of Chicavasco, Hidalgo State, Mexico. *South Florida Journal of Development*, 3(1), 335-344. DOI: 10.46932/sfjdv3n1-026.

García-Gómez, R.S. (2022). Antocianinas del maíz azul (*Zea mays*)¿ Sustancias inocuas? Parte 5. Revisión bibliográfica de avances en los últimos 10 años. *Ambiens Techne et Scientia México*, 10(1), 117-150.

Diario Oficial de la Federación. (2002). NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. http://www.ordenjuridico. gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf.

Olivas-Tarango, A.L., Ojeda-Barrios, D.L. & Tarango-Rivero, S.H. (2024). Rendimiento, Calidad de Nuez y Alternancia en Nogal Pecanero, como Respuesta a la Aplicación de Quelatos de Zinc en un Suelo Alcalino. *Terra Latinoamericana*, 42.8 https://doi.org/10.28940/terra. v42i0.1708.

Pino-Silvera, J.S. (2023). Principales técnicas para la recuperación de los suelos arenosos. BABAHOYO: UTB, 2023.

SADER. (2024). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Maíz, cultivo de México. Anual. 31 de diciembre de 2024. https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/

SIAP. (2024). Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de Producción Agrícola. Avance de Siembras y Cosechas. 31 de diciembre de 2024. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/.

Verhulst, N., Sayre, K. & Govaerts, B. (2012). Manual de determinación de rendimiento. México, Ciudad de México, SAGARPA, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, 27-34. https://idp.cimmyt.org/publicacion/manual-del-determinacion-de-rendimiento/.

Xochipa-Morante, R.C., Escobedo-Garrido, J.S., Macías-López, A., Guerrero-Rodríguez, J.D.D., Valadez-Ramírez, M. & Mora-Flores, J. S. (2021). Consumidores de productos de maíz azul en mercados de productores, Sierra Nevada, Puebla, México. Estudios sociales. *Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional*, 31(58). https://doi.org/10.24836/es.v31i58.1176.

TAMAÑO Y FECHA DE SIEMBRA DE AJO PARA EVALUAR LOS PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN EN CUAHUTÉMOC, CHIHUAHUA

Silvia Amanda García Muñoz[1]; Francisco Javier Piña Ramírez[1]; Anabel Ortega Rodríguez[1]; Arwell Natán Leyva Chávez[1]; Addy Anchondo Aguilar [1]; Ricardo Aarón González Aldana[1]

[1] Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Campus l, Chihuahua, Chih., México. C.P. 31000.

Correo del autor de correspondencia: jpina@uach.mx

RESUMEN

En el manejo agronómico del cultivo del ajo **(***Allium sativum* L.**)**, la época de plantación y el tamaño del bulbo son factores decisivos para su producción. Siendo una de las hortalizas más rentables a nivel nacional, donde los principales estados productores en México son: Zacatecas, Guanajuato, Nuevo León, mientras que Chihuahua participa con muy baja producción. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del tamaño de semilla y la fecha de siembra en parámetros productivos en Cuauhtémoc, Chihuahua, México. El ajo utilizado es el morado, se seleccionaron tres tamaños de dientes chico, mediano y grande (1.0 cm, 1.5 cm y 2.0 cm de largo respectivamente) y fueron plantados con una distancia de 50 cm, en tres camas de siembra: temprana (30 de octubre), intermedia (6 de noviembre) y tardía (17 de diciembre). Se utilizó un arreglo de parcelas divididas en un diseño de bloques completos al azar con cinco repeticiones, la parcela fue la fecha de siembra y la subparcela el tamaño del diente. El peso del bulbo y el tamaño de la planta fueron alterados por el tamaño del diente grande y la fecha de siembra temprana. Los mejores valores en producción se obtuvieron por la fecha de siembra temprana, así como el tamaño del diente de ajo grande.

PALABRAS CLAVE: *Allium sativum; diámetro del bulbo; número de capas; modelo lineal aditivo**;** peso del bulbo.*

INTRODUCCIÓN

México es contemplado como el segundo productor de ajo en el continente americano después de Estados Unidos, ubicándose entre los ocho principales países exportadores a nivel mundial junto con China, Tailandia, España, Argentina, Italia, Estados Unidos y Corea. En el año 2023, México, participó con una superficie sembrada de 8,618 ha y una producción de 110,110 t, con un rendimiento de 12.78 t ha^{-1}. Chihuahua participó con 134 ha, con una producción de 1,730 t, y 13 t ha^{-1} (SIAP,2023). Las principales áreas productoras del ajo en México son: Zacatecas con 61,190 t, Guanajuato con 12,449 t, Nuevo León con 7,716 t, estas tres entidades representaron el 74% de la producción nacional (Blog Agricultura, 2023).

El sembrado del ajo se lleva a cabo manualmente, hundiendo el diente en el suelo a una profundidad de 4 a 6 cm, con la punta hacia arriba; "esta labor requiere experiencia, ya que de esto depende una buena germinación y el desarrollo de la planta" (Calderón *et al*., 2003). Es importante también la "calidad sanitaria, el tamaño, el peso y la posición en que es colocada la semilla de ajo al momento de la siembra" (Burba, 2003). Así como en la venta del ajo, el diámetro y peso del bulbo son características importantes, también el "aspecto físico es tomado en cuenta, la cubierta uniforme de las catáfilas" (Macías *et al*., 2010).

Estudios previos mencionan que el "estado de Chihuahua tiene un alto potencial para la producción de ajo en la región centro-sur del estado, la cual reúne condiciones agroclimáticas que favorecen un buen rendimiento y calidad" (Acosta *et al.,* 2007). Se considera que esta especie también se puede cultivar en la región Noroeste, principalmente en el municipio de Cuauhtémoc, representando una alternativa a la producción agrícola otoño-invierno, con perspectivas de exportación por su cercanía con la frontera estadounidense. El objetivo del presente trabajo fue evaluar los diferentes parámetros de producción con diferentes tamaños de semilla y diferentes fechas de siembra en el cultivo del ajo en la región de Cuauhtémoc, Chihuahua, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en Cuauhtémoc, Chihuahua a 28°24'18" LN y 106°52'00" LO, y con una altitud de 2,060 msnm, y con un clima semiárido templado y frío. Para el presente estudio se utilizó ajo morado comercial. Los bulbos se desgranaron tres días antes de la siembra, se seleccionaron tres tamaños de dientes para la siembra: chico (1.0 cm de largo), mediano (1.5 cm de largo) y grande (2.0 cm de largo), con una distancia de plantación de 50 cm; en tres camas de siembra (1.5 m x 0.60 m), correspondiendo cada una de ellas a la fecha de siembra: temprana (30 de octubre), intermedia (6 de noviembre) y tardía (17 de diciembre).

Los dientes de ajo fueron desinfectados antes de su plantación utilizando dos fungicidas y un insecticida. La siembra fue manual, con un diseño de plantación a tresbolillo a una distancia de 10 x 10 cm, entre planta y profundidad de 3 a 6 cm. Cada diente se depositó con la parte apical hacia arriba. En la fertilización se utilizó la dosis recomendada 180-00-00, aplicando urea en forma fraccionada, el agua de riego se aplicó mediante riego por goteo. Se utilizó un arreglo de parcelas divididas en un diseño de bloques completos al azar con cinco repeticiones, la parcela fue la fecha de siembra y la subparcela el tamaño de la semilla (diente). Se evaluó la producción (peso y diámetro de bulbo, número de capas) y el desarrollo de la planta (altura, peso fresco y peso seco). Se realizó el análisis estadístico de acuerdo al modelo lineal aditivo, se utilizó la Diferencia Mínima Significativa (DMS, α 0.05) para la separación de medias de tratamiento, en caso de interacción significativa, se analizó la naturaleza de la interacción (Steel y Torrie, 1988).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con respecto a la fecha de siembra, fueron altamente significativas peso del bulbo, diámetro del bulbo, número de capas y altura de la planta, en tanto que peso fresco y

peso seco de la planta no tuvieron respuesta significativa, lo que nos indica que la fecha de siembra tiene una influencia directa principalmente sobre los parámetros de producción (Figura 1).

En cuanto a la época de siembra, la fecha temprana registró estadísticamente el mayor valor 35.8 g en promedio por bulbo, siendo superior a la fecha intermedia en un 20% y la fecha tardía en un 32%, esto resalta la importancia de la siembra del ajo durante el mes de octubre, mientras que en el mes de diciembre fecha tardía algunos de los parámetros de producción se ven afectados al igual que los calibres predominando calibres pequeños. "En fechas muy tempranas, el calor puede interferir aumentando considerablemente el número de dientes por bulbo" (Valenzuela *et al.*, 2012). Los datos obtenidos en este estudio concuerdan con Valenzuela *et al*. (2008) y Valenzuela *et al.* (2012), "quienes indican que el peso del bulbo decreció notable y drásticamente en las fechas tardías".

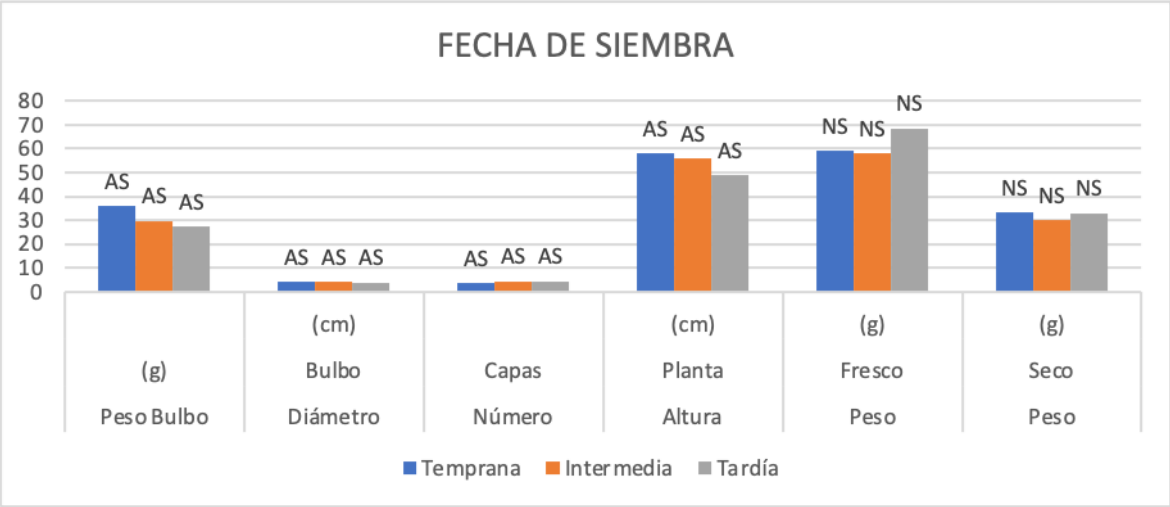


Figura 1. Nivel de significancia (NS=No significativo, S=Significativo y AS=Altamente significativo) y efectos de la fecha de siembra (Temprano, Intermedio y Tardía) del ajo sobre los parámetros de producción y desarrollo.

Esta misma variable peso del bulbo también fue afectada significativamente por el tamaño del diente obteniendo un peso promedio de 37.1 g (Figura 2), para el tamaño del diente grande, estadísticamente superior en un 19% al tamaño mediano y un 51% al tamaño chico. Por otro lado, "los bulbos de tamaño grande, utilizados como material de propagación, promueven un crecimiento uniforme y buen vigor de la plántula, e inducen mayor rendimiento y calidad del ajo" (Burba, 2008). La mejor fecha de siembra para los ajos blancos es la primera quincena de noviembre, aunque se pueden sembrar desde el inicio de octubre hasta finales de noviembre.

El número de capas, solamente fue afectada por la fecha de siembra (Figura 1), que en este caso la media mayor se obtuvo con la siembra tardía (Figura 2) con una media de 4.46 capas, significativamente mayor al de la cosecha temprana en un 19%, esta característica aparentemente podría ser benéfica en el sentido de que mayor número de capas se tendrá mayor protección al diente y por lo tanto mayor vida de anaquel.

Sin embargo, en nuestro estudio precisamente la cosecha tardía que obtuvo el mayor número de capas también presento el menor peso y diámetro del bulbo es decir que al sembrar tarde podría haber una reorientación de los fotosintatos no hacia la parte económicamente importante como es el diente, sino al desarrollo de la envoltura de protección que podría ser una característica indeseable el mayor número de envolturas y además, en la cosecha tardía, hubo bulbos que no alcanzaron a desarrollarse completamente.

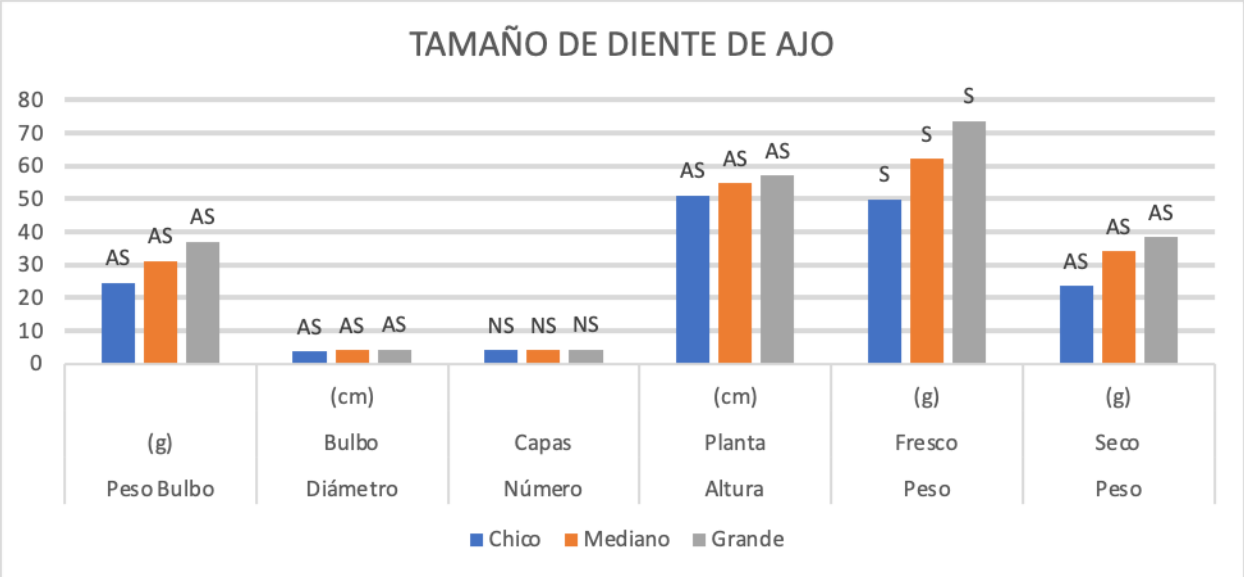


Figura 2. Efectos del tamaño del diente de ajo (Chico, Mediano y Grande) sobre los parámetros de producción y desarrollo.

La altura de la planta, fue afectada significativamente tanto por la fecha de siembra como por el tamaño del diente (Figura 1 y 2) (Nelson, 2013) con el cultivar de ajo Napura alcanzó una altura de planta (50.61 cm). Mientras que, el presente estudio, la altura más alta fue de (64.2 cm). Las variables peso fresco y peso seco ambas variables fueron afectadas por el tamaño del diente (Figura 2) presentando nuevamente el tamaño grande el mayor peso promedio con 73.6 g (planta completa). Una situación similar se registró en peso seco, en donde el tamaño grande fue estadísticamente similar al tamaño intermedio, pero significativamente mayor que el tamaño chico.

Un aspecto interesante es que el peso seco fue mayor a 52% en el caso del tamaño del diente grande y mediano que fueron significativamente mayores al tamaño chico que presentó un 47% de humedad; por lo tanto, el umbral del 50% del contenido de humedad (o peso seco) del peso total de la planta podría ser un índice del desarrollo de la planta y también de producción, ya que, para el tamaño del diente grande, el peso promedio del bulbo fue de 37.1 g, representa el 50% de peso fresco de la planta. Este
50% del peso del bulbo en cosecha fue constante para el tamaño del diente grande y mediano mientras que el diente chico fue de 49%, recordando que hubo diferencia significativa para estas dos variables.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados del trabajo de investigación, la fecha de siembra temprana (30 de octubre) obtuvo los mejores valores en producción: peso y diámetro de bulbo, principales indicadores de rendimiento del ajo a nivel comercial. Por lo cual, se sugiere evaluar fechas de siembras desde los primeros de octubre para una mejorrespuesta del cultivo. El tamaño de la semilla grande (2.0 cm de largo) fue el que obtuvo los mejores resultados en producción (peso y diámetro del bulbo) y desarrollo de la planta (altura, peso fresco y peso seco), por lo que sería importante considerar estos parámetros productivos para mayor productividad.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta-Rodríguez G.F., Lujan-Favela M. & Parra-Quezada R. A. (2007). Crecimiento y Rendimiento de Cultivares De Ajo en Delicias, Chih. p 4-9.

Blog Agricultura. 2023. Estadística de la producción de ajo en México. Blog Agricultura – Información y estadísticas del agro.

Burba, J.L. (2008). Los grupos varietales del ajo (*Allium sativum* L.). Contribución para su entendimiento. *Horticultura Argentina* 27: 20-26.

Burba, J. L. 2003. Producción de ajo. Documento proyecto AJO/INTA 069. INTA. Estación Experimental La Consulta. La Consulta, Mendoza, Argentina. 43p.

Calderón R., E., R. Serwatowski H., J. M. Cabrera S. & C. Gracia L. (2003). Siembra mecanizada del ajo: métodos y equipos. *Agrociencia*, 37: 483-493. https://www.redalyc.org/pdf/302/30237505.pdf.

Macías D. R.; Grijalva C. R. L. & Robles C. F. (2010). Productividad y calidad de variedades de ajo (Allium sativum L.) bajo condiciones desérticas en Caborca, Sonora. *Biotecnia*. 7:44-50

Nelson, S. N. C. (2013). Efecto de la densidad de siembra en dos ecotipos de Ajo (*Allium sativum* L.) conducido con manejo orgánico y riego por aspersión en Chiñama, distrito de Kañaris. (Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Facultad de Agronomía). https://hdl.handle.net/20.500.12893/1031.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. 2023 https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/.

Steel R G, Torrie J H. (1988). Bioestadística: Principios y Procedimientos. Traducción de Ricardo Martínez B. Ed. Mc Graw Hill. Segunda Edición. p 368-391.

Valenzuela, C.P, M. Chávez C., E. Valenzuela C., A. Álvarez A., J. López E. & M.A. Huez López. (2008). Evaluación de fechas de siembra de ajo jaspeado (*Allium sativum* L.) cultivar Inifap, en la sierra baja del río Sonora". Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, B.C. En: Memorias XI Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas, 390-394.

Valenzuela, C.P., A. Álvarez A., J. López E., M.A. Huez-López, J.A. Márquez Contreras y G. Ocampo Ramírez. (2012). Rendimiento y calidad de ajo (*Allun sativum* L.) establecido en nueve fechas de siembra en la región de la Costa de Hermosillo.

AVANCES Y DESAFÍOS EN LA PRODUCCIÓN Y USO DE BACTERIAS NATIVAS COMO PROBIÓTICOS VEGETALES EN LA AGRICULTURA MEXICANA

Clara Ivette Rincón Molina[1]; Luis Alberto Manzano Gómez[1,3]; Luis Galdino García Pérez[2]; Francisco Alexander Rincón Molina[1]; Reiner Rincón Rosales[1]

[1] Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez/Tecnológico Nacional de México, Tuxtla Gutiérrez, 29050, Chiapas, México.
[2] Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, 29039, Chiapas, México.
[3] 3R Biotec SA de CV, Tuxtla Gutiérrez, 29000, Chiapas, México.

Correo del autor de correspondencia: clara.rm@tuxtla.tecnm.mx

RESUMEN

La agricultura mexicana enfrenta el reto de mejorar la productividad sin comprometer la sostenibilidad ambiental. El uso intensivo de fertilizantes químicos ha provocado deterioro del suelo, contaminación hídrica y dependencia de insumos importados. En este contexto, los biofertilizantes representan una alternativa viable, en especial aquellos formulados con bacterias nativas que actúan como probióticos vegetales. Este trabajo revisó los avances científicos y tecnológicos, así como los desafíos regulatorios y prácticos que enfrenta el sector de biofertilizantes en México. Se identificaron esfuerzos históricos desde los años ochenta, así como innovaciones recientes como la aplicación de consorcios microbianos y técnicas de encapsulamiento. Se analizaron programas públicos relevantes y se discutieron riesgos asociados al uso de microorganismos mal caracterizados, particularmente en relación con genes de resistencia a antibióticos. Asimismo, se resaltó la necesidad de una regulación más estricta que garantice la seguridad biológica de los productos disponibles en el mercado. Finalmente, se propuso una ruta de investigación enfocada en el aprovechamiento de cepas bacterianas que aseguren su uso inocuo, la caracterización genómica de las mismas y la articulación entre academia, industria y políticas públicas para fortalecer la soberanía biotecnológica agrícola del país. Las conclusiones destacan la necesidad de reforzar la regulación, invertir en investigación multidisciplinaria y fomentar el uso de tecnologías apropiadas para el desarrollo local de bioinsumos.

PALABRAS CLAVE: *agricultura sostenible; bacterias nativas; biofertilizantes; probióticos vegetales; seguridad biológica*

INTRODUCCIÓN

El uso intensivo de fertilizantes químicos ha generado preocupación global por su impacto negativo en los ecosistemas, particularmente en la calidad del suelo, el agua y la biodiversidad (Mahanty *et al.,* 2017). En este contexto, el desarrollo de biofertilizantes se posicionó como una alternativa biotecnológica viable para promover la sostenibilidad agrícola, reducir el uso de agroquímicos y conservar los recursos naturales (Gehlot *et al.,* 2021; Vassilev *et al.,* 2015). En México, país con alta diversidad agrícola y microbiana, el

interés por estos insumos creció paulatinamente desde la década de 1980, cuando se registraron los primeros ensayos exitosos con inoculantes rizobiales aplicados en leguminosas (Armenta-Bojórquez, 1986). A pesar del potencial demostrado por los biofertilizantes, su adopción masiva en el país ha sido limitada por factores técnicos, regulatorios y de percepción. El término "biofertilizante" fue en ocasiones utilizado de forma incorrecta para referirse a productos que no contenían microorganismos definidos ni efectos comprobables sobre las plantas (Das, 2019). En contraste, un biofertilizante propiamente dicho fue definido como un producto con composición microbiana conocida, capaz de promover el crecimiento vegetal a través de mecanismos como la fijación biológica de nitrógeno o la solubilización de fósforo (Daniel *et al.,* 2022). El desarrollo de nuevas herramientas moleculares y de secuenciación permitió caracterizar con mayor precisión las cepas microbianas utilizadas, identificar genes funcionales y mejorar la eficiencia y estabilidad de los productos formulados (Adeleke *et al.,* 2022; Kumar *et al.,* 2017). Sin embargo, también se evidenció la necesidad de evaluar aspectos relacionados con la seguridad biológica, como la presencia de genes de resistencia a antibióticos o factores de virulencia en cepas mal seleccionadas (Larsson *et al.,* 2022). Frente a este panorama, resultó necesario analizar el estado actual de los biofertilizantes en México, desde su evolución histórica hasta los retos técnicos, ambientales y normativos que condicionan su implementación. Esta revisión tuvo como propósito ofrecer una visión crítica sobre las oportunidades y limitaciones del uso de bacterias nativas como probióticos vegetales, considerando su impacto sobre la sostenibilidad agrícola y su papel en las políticas públicas del sector.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente revisión se llevó a cabo mediante el análisis integral de literatura científica especializada, enfocada en el desarrollo, producción y aplicación de bacterias nativas utilizadas como biofertilizantes en la agricultura mexicana. Se consultaron publicaciones indexadas en bases de datos académicas y fuentes oficiales del gobierno mexicano relacionadas con la regulación de insumos biológicos. La localización del estudio correspondió al contexto agrícola de México. Se identificaron prácticas asociadas a la producción artesanal y comercial de biofertilizantes, incluyendo el uso de cepas bacterianas del género *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Bacillus*, *Pseudomonas* y otros microorganismos de interés agronómico. Se analizaron técnicas actuales de formulación, tales como la encapsulación, el uso de portadores sólidos y líquidos, y los procesos de fermentación para la producción a escala industrial. Asimismo, se consideraron elementos del diseño experimental reportados en estudios de campo, incluyendo la aplicación en cultivos como maíz, tomate y leguminosas, así como la evaluación de su eficacia en condiciones de diferentes tipos de suelo y disponibilidad de fósforo. El periodo de análisis comprendió investigaciones realizadas desde la década de 1980 hasta el año 2025. Se incorporaron además criterios regulatorios establecidos por la norma NOM-077-FITO-2000, que establece los requisitos microbiológicos y de efectividad para el registro de productos biofertilizantes en México. Finalmente, se evaluaron metodologías moleculares recientes como la secuenciación genómica, el análisis

proteómico y la identificación de genes funcionales como ureC, nosZ y amoA, utilizados para caracterizar el potencial biotecnológico y la seguridad biológica de las cepas empleadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación de biofertilizantes en México presentó una evolución significativa desde su introducción en la década de 1980, cuando se registraron los primeros ensayos exitosos con inoculantes rizobiales en leguminosas (Armenta-Bojórquez, 1986). A partir de estos antecedentes, se impulsó la investigación sobre consorcios microbianos, como bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB) y hongos micorrízicos arbusculares (AMF), los cuales demostraron efectos positivos sobre la asimilación de fósforo, la fijación de nitrógeno y la producción de fitohormonas (Sahgal *et al.,* 2020; Soumare *et al.,* 2020).

Se observó que la combinación de PGPB con AMF generó efectos sinérgicos que mejoraron la estructura del suelo, incrementaron el contenido de materia orgánica y optimizaron el desarrollo radicular en cultivos como maíz y tomate. Estudios proteómicos revelaron que la coinoculación de estos microorganismos moduló positivamente mecanismos de defensa vegetal y productividad (Concha y Doerner, 2020).

En el ámbito regulatorio, la producción y comercialización de biofertilizantes en México es supervisada por la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), bajo la norma NOM-077-FITO-2000 (https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5592222&fecha=24/04/2020#gsc.tab=0, consulta: septiembre 02, 2025). Esta norma establece los criterios microbiológicos mínimos para garantizar la calidad y seguridad de los productos, así como su eficacia agronómica. A pesar de ello, se identifica una saturación del mercado con productos de baja calidad, formulados sin respaldo técnico y con cepas no caracterizadas adecuadamente.

Desde el punto de vista molecular, se documentaron riesgos asociados a la presencia de genes de resistencia a antibióticos (ARGs) y factores de virulencia (VFs) en algunas cepas utilizadas en biofertilizantes comerciales (Larsson y Flach, 2022). Esta situación resaltó la importancia de implementar estrategias de selección de cepas nativas con bajo riesgo biológico, así como la eliminación de genes no deseados mediante herramientas de edición genética (Wang y Chen, 2022).

En cuanto a los mecanismos biológicos, se reportó que las bacterias probióticas vegetales promovieron el crecimiento mediante la fijación biológica de nitrógeno (*Rhizobium, Azospirillum*), la solubilización de fósforo (*Pseudomonas, Bacillus*), la producción de sideróforos para mejorar la disponibilidad de hierro y la síntesis de fitohormonas como auxinas, giberelinas y citoquininas (Glick y Glick, 2020; Bhattacharyya y Jha, 2012). Además, se demostró que estas bacterias indujeron resistencia sistémica en las plantas, fortaleciendo su capacidad para enfrentar condiciones adversas y ataques patógenos (Gupta y Pandey, 2023).

Se identificaron también múltiples desafíos en la producción y adopción de biofertilizantes, entre ellos: la falta de estandarización en las formulaciones, la baja

viabilidad durante el almacenamiento, el limitado acceso a infraestructura para su producción local y la escasa capacitación técnica entre productores. Asimismo, las condiciones agroecológicas variables y la diversidad de suelos dificultaron su efectividad uniforme en campo abierto (Schmidt y Gaudin, 2018).

Finalmente, se destacó que la sostenibilidad ambiental derivada del uso de biofertilizantes incluyó la reducción de la volatilización de amoníaco, la disminución de emisiones de óxidos de nitrógeno y la mejora de la salud del suelo. Particularmente, cepas de *Bacillus subtilis* y *Rhizobium* con genes funcionales como *ureC* y *nosZ* lograron mitigar emisiones contaminantes, aportando beneficios tanto agronómicos como ecológicos (Rincón-Molina *et al*., 2025).

CONCLUSIONES

El uso de biofertilizantes formulados con bacterias nativas representa una estrategia viable y sostenible para mejorar la productividad agrícola en México, al tiempo que se reduce la dependencia de insumos químicos. Las bacterias probióticas vegetales favorecen el crecimiento de las plantas mediante mecanismos bien caracterizados como la fijación de nitrógeno, la solubilización de fósforo, la producción de fitohormonas y la inducción de resistencia sistémica.

La evidencia científica demuestra que la coinoculación de consorcios microbianos, como bacterias promotoras del crecimiento y hongos micorrízicos arbusculares, genera efectos sinérgicos que benefician tanto al cultivo como al suelo. La implementación de tecnologías como la encapsulación, el uso de portadores adecuados y la caracterización genética de las cepas empleadas mejora la eficacia, estabilidad y seguridad de los productos biofertilizantes.

No obstante, persisten retos importantes en términos de regulación, estandarización de calidad, riesgos biológicos potenciales y transferencia de conocimiento al sector agrícola. La adopción generalizada de biofertilizantes requiere fortalecer los marcos normativos, fomentar la investigación interdisciplinaria y garantizar la participación activa de productores, instituciones científicas y organismos gubernamentales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México, campus Tuxtla Gutiérrez, por las facilidades otorgadas para la realización de esta investigación. Se reconoce el apoyo financiero brindado por SECIHTI mediante la asignación de becas posdoctorales y doctorales, así como a la empresa 3R Biotec SA de CV por su colaboración técnica.

BIBLIOGRAFÍA

Adeleke, B.S., Fadiji, A.E., Ayilara, M.S., Igiehon, O.N., Nwachukwu, B.C., Babalola, O.O. (2022). Strategies to enhance the use of endophytes as bioinoculants in agriculture. *Horticulturae,* 8(6):498. https://doi.org/10.3390/horticulturae8060498.

Armenta-Bojórquez, A.D., Ferrera-Cerrato, R., Trinidad, S.A., & Volke, H.V. (1986). Fertilización e Inoculación con *Rhizobium* y Endomicorrizas (V-A) en Garbanzo Blanco (*Cicer arietinum* L.) en Suelos del Noroeste de México. *Agrociencia*. (65):141-160. https://biblat.unam.mx/es/revista/agrociencia/articulo/fertilizacion-e-inoculacion-con-rhizobium-y-endomicorrizas-v-a-en-garbanzo-blanco-cicer-arietinum-l-en-suelos-del-noroeste-de-mexico

Bhattacharyya, P.N. & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28, 1327-1350. https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9

Concha, C., & Doerner, P. (2020). The impact of the rhizobia–legume symbiosis on host root system architecture. *Journal of Experimental Botany*, 71(13), 3902-3921. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa198.

Daniel, A.I., Fadaka, A.O., Gokul, A., Bakare, O.O., Aina, O., Fisher, S., Klein, A. (2022). Biofertilizer: the future of food security and food safety. *Microorganisms* 10(6):1220. https://doi.org/10.3390/microorganisms10061220.

Das, H.K. (2019). Azotobacters as biofertilizer. *Advances in Applied Microbiology* 108:1–43. https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2019.07.001.

Gehlot, P., Pareek, N. & Vivekanand, V. (2021). Development of biofertilizers and microbial consortium an approach to sustainable agriculture practices. *Plant, Soil and Microbes in Tropical Ecosystems*, 315-348. 10.1007/978-981-16-3364-5_15.

Glick, B. R. & Glick, B.R. (2020). Introduction to plant growth-promoting bacteria. *Beneficial plant-bacterial interactions*, 1-37. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44368-9_1.

Gupta, S. & Pandey, S. (2023). Plant growth promoting rhizobacteria to mitigate biotic and abiotic stress in plants. Sustainable Agriculture Reviews 60: *Microbial Processes in Agriculture*, 47-68. 10.1007/978-3-031-24181-9_3.

Kumar, M., Saxena, R., Tomar, R.S. (2017). Endophytic microorganisms: promising candidate as biofertilizer. In: Singh DP, Singh HB, Prabha R, eds. *Microorganisms for Green Revolution, Microbes for Sustainable Crop Production*. Vol. 1. Singapore: Springer. p. 77–85. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6241-4_4

Larsson, D. G. & Flach, C. F. (2022). Antibiotic resistance in the environment. *Nature Reviews Microbiology*, 20(5), 257-269. https://doi.org/10.1038/s41579-021-00649-x.

Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A. & Tribedi, P. (2017). Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture development. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 3315-3335. 10.1007/s11356-016-8104-0.

Diario Oficial de la Federación (2002). Norma Oficial Mexicana, NOM-021-RECNAT-2000, que establece las Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, muestreo y análisis índice.

Rincón-Molina CI, Manzano-Gómez LA, García-Pérez LG, Rincón-Molina FA, Rincón-Rosales R. 2025. Advances and challenges in the production and use of native bacteria as plant probiotics in agronomic applications: a Mexican review. *Journal of Agriculture and Food Research* 21:101917. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101917

Sahgal, S., & Srivastava, D. (2020). Utilization of Microbial Diversity as Biofertilizers. *International Journal of Plant and Environment,* 6(03), 218-221. https://doi.org/10.18811/ijpen.v6i03.11

Schmidt, J. E., & Gaudin, A.C. (2018). What is the agronomic potential of biofertilizers for maize? A meta-analysis. *FEMS Microbiology Ecology*, 94(7), fiy094. 10.1093/femsec/fiy094

Soumare, A., Boubekri, K., Lyamlouli, K., Hafidi, M., Ouhdouch, Y. & Kouisni, L. (2020). From isolation of phosphate solubilizing microbes to their formulation and use as biofertilizers: status and needs. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7, 425. https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00425

Vassilev, N., Vassileva, M., Lopez, A., Martos, V., Reyes, A., Maksimovic, I. & Malusa, E. (2015). Unexploited potential of some biotechnological techniques for biofertilizer production and formulation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, 4983-4996. https://doi.org/10.1007/s00253-015-6656-4.

Wang, J. & Chen, X. (2022). Removal of antibiotic resistance genes (ARGs) in various wastewater treatment processes: An overview. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52(4), 571-630. https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1835124.

ECO-FRIENDLY POLYMER FORMULATIONS FOR SUPPRESSING SOIL EROSION AND ENHANCING SOIL PROPERTIES

Olga Yakimenko[1]; Alexander Yaroslavov[2]; Irina Panova[2]; Olga Novoskoltseva[2]; Egor Smolsky[1]; Alexander Kiushov[2]; Pavel Krasilnikov[1]

[1] Soil Science Faculty, [2] Faculty of Chemistry, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1-12, Moscow, Russia.

Corresponding author: iakim@soil.msu.ru

ABSTRACT

A number of polymer-based formulations were tested in laboratory and field experiments as soil ameliorants focused on combating soil erosion and enhancing soil properties. Individual polyelectrolytes: polycation polydiallyldimethylammonium chloride (PDDA), polyanion hydrolyzed polyacrylonitrile (HYPAN), natural polyanions of humic substances (HS), as well as complex formulations presented by interpolyelectrolyte complexes (IPECs) and binary compositions were used. HYPAN-based formulations showed the lack of toxicity in soil media, were capable of forming protective soil-polymer coatings, decreased loss of soil affected by wind and water flow, and improved soil hydrophysical properties. In HM-spiked soil-polymer mixtures, combinations of synthetic HYPAN with natural humic biopolymers decreased the content of mobile Cu, Zn, Pb, and Cd species. In field tests carried out in the arid sandy soil of Uzbekistan, a 1 wt.% HYPAN formulation provided almost 100% resistance of the soil coating to blowing loss for at least six months. The effects on soil hydrophysical properties were mainly governed by synthetic polymers, whereas the effects on soil chemical and biological properties were influenced by HS.

KEYWORDS: *humic substances; hydrolyzed polyacrylonitril; interpolyelectrolyte complex; soil conditioner; water retention.*

INTRODUCTION

Land erosion and degradation is one of the most important problems worldwide. To combat it, traditional methods like good agrotechnical practices, forest reclamation, and others are widely used. As an alternative, one can consider an approach with the application of environmentally friendly chemical reagents, water-soluble polymers of synthetic and/or natural origin capable of binding soil particles, and thus preventing erosion and deflation (Sikder *et al.,* 2021).

Among these are polyelectrolytes (PE): hydrophilic polymers containing functional groups capable of ionization (Panova *et al.,* 2021). Depending on the chemical nature and structure of macromolecules, their ability to mitigate the effects of water and wind erosion, deposit plant nutrients, bind toxicants, and optimize water-holding properties has been shown (Delgado *et al.,* 2024). The effect of PE as soil binders is widely reported. When applied on the soil surface, PEs form protective polymer-soil coatings or "crusts" (Zezin *et al.,* 2015). Positively charged polycations are the most effective in this regard

due to their ability to interact with negatively charged sites on the soil particles and thus to form a strong protective coating. However, polycations are known to be toxic to bacteria and fungi, which causes concerns (Carmona-Ribeiro and de Melo Carrasco, 2013).

To avoid potential toxicity, bi-component formulations could be more prospective compared to individual polymers. Among these are interpolyelectrolyte complexes (IPECs) formed by the interaction of two oppositely charged PE (Novoskoltseva *et al.,* 2021; Panova *et al.,* 2021). This applies to both synthetic and natural polymers. Among the latter are humic substances (HS)—natural polyanions that are widely used as soil conditioners and biostimulants in agricultural technologies (Jindo *et al.,* 2020).

IPECs contain a lower proportion of toxic components but retain the properties of a soil binder. Another option could be binary compositions consisting of several individual polymers, for example, a synthetic polyanion and HS.

The objective of this study was to examine in model and field experiments the effects on anti-erosion resistance, soil hydrophysical properties, ecotoxicity, and detoxication ability of a number of individual polymeric soil ameliorants and to reveal advantages of two-component formulations compared to individual polymers. Based on the results obtained, the most promising formulations will be further tested and promoted for the restoration of contaminated and disturbed soils.

MATERIALS AND METHODS

Among the individual polyelectrolytes, we used a commercially available synthetic polycation polydiallyldimethylammonium chloride (PDDA), synthetic polyanion hydrolyzed polyacrylonitrile (HYPAN), and natural polyanions of humic substances (HS) as commercial potassium humates. The tested IPECs were prepared by the interaction of two oppositely charged ionic polymers, PDDA+HYPAN and PDDA+HS, at ratios of 10:1, 3:1, and 1:1. Binary polymer-humic formulations composed of HYPAN+HS at ratios of 10:1 and 1:1.

Model experiments were conducted using soil samples different in texture, pH, humus content, and salinity. Specifically: sandy loam arable Albic Glossic Retisol (Moscow region, Russia: sand 52%, silt 39%, and clay 9%; pH 6.6; Ctot 4.4%); sandy agrozem Dystric Arenosol (Pskov region, Russia: sand 86%, silt 12%, and clay 2%; pH 4.7; Ctot 4.4%); and sandy Aridic Arenosol (Nukus region, Uzbekistan: sand 97.2%, silt 2.1%, clay 0.7%; pH 7.95, Ctot 0.49%, EC 0.07 dS $\cdot m^{-1}$).

Ecotoxicity of polymer formulations was assessed using standard toxicity bioassays using cultures of bacteria *Escherichia coli*, the ciliate *Paramecium caudatum*, earthworms *Eisenia foetida*, and three plant species (*Sinapis alba, Raphanus sativum*, and *Triticum durum*).

In model experiments, we used two approaches for polymer application: spraying technology and injecting technology. In the former one, solutions of polymer formulations were sprayed on the soil, which resulted in the formation of a polymer-soil coating (crust) on the surface. For this set of experiments, the mechanical strength and protective anti-erosion properties of polymer-soil coatings were determined. The mechanical strength of the crusts was characterized by a plastic deformation method

using a Rebinder conical plastometer. In laboratory anti-erosion experiments, a water flow from a spray gun was directed onto the surface of the sample with a formed polymer-soil coating in a pulsed mode for 10 minutes. After drying, the weight loss was calculated. A similar procedure was used to evaluate the resistance to wind, using an air flow.

For experiments with injecting technology, polymers were uniformly mixed with the bulk soil. In soil-polymer mixtures, the size distribution of the soil aggregates and proportion of water-stable aggregates were determined using dry and wet sieving methods. In a parallel set of experiments, soil-polymer mixtures were spiked with heavy metals (Cu, Zn, Pb, and Cd), and the contents of available species of elements were determined.

Field tests were conducted on the arid area in the Nukus region, Republic of Uzbekistan, from which soil samples were taken for the laboratory experiments. The experimental plot of 27 m² was divided into three smaller sites of 9 m² each. HYPAN solutions (0.7 and 1 wt.%) were applied to these sites using a backpack sprayer, thus completely wetting the soil surface. Four rulers 20 cm long, installed to a depth of 10 cm, were used as beacons on each site. The rulers allowed measuring the removal of soil material (thickness of the wind-blown soil layer, W) with an accuracy of 1 mm. Observations were carried out from April 11 to October 23, 2023.

RESULTS AND DISCUSSION

Ecotoxicity. The toxicity of PDDA and IPEC, consisting of PDDA+HS, was high for bacterial culture and ciliate, and less for higher plants (Yakimenko *et al.*, 2022). However, in soil matrices, the phytotoxicity of PDDA and IPEC was negligible. The reason is that the toxicity of cationic polymers decreases as they enter the soil matrix and bind to organic matter and minerals. Toxicity tests with *Eisenia foetida* revealed that higher mortality rates were detected at a concentration of 500 mg kg^{-1} and higher. IPEC, consisting of PDDA+HYPAN, did not show a toxic effect on earthworms at concentrations up to 2000 mg kg^{-1}. With a standard application rate of polymeric ameliorants, their actual content in the soil will be approximately 1500 mg kg^{-1}. Thus, all polymeric meliorants (IPECs, HYPAN, and HS) were nontoxic at applicable concentrations that allowed the formation of polymeric soil crusts against erosion.

Anti-erosion resistance and soil hydrophysical properties. Being applied to a soil surface, HYPAN-based formulations formed soil-polymer coatings resistant to the detrimental effects of water and air flows. Some results for two soils and formulations are presented in Table 1. Both IPEC and binary composition drastically decreased the loss of soil, being more pronounced in sandy soil.

Table 1. Loss of soil after exposure of initial and polymer-treated soils to wind and water flows at a consumption rate of 2 L m^{-2} for two soils and different formulations, wt%.

Soil and Formulation	Wind	Water
Sandy Aridic Arenosol, control	100	49±6
HYPAN 1%	0	17±3
IPEC [HYPAN+PDDA], 1%	0	10±2
Sandy loam Albic Glossic Retisol, control	57 ± 8	39 ± 5
HYPAN 1%	0	7 ± 1
HS, 0.1%	63 ± 10	33 ± 6
Binary composition [HYPAN-HS] 10:1	0	8 ± 2

Being mixed with the entire soil volume, all formulations affected soil aggregate composition differently. HS increased the proportion of large fractions, whereas HYPAN alone and in compositions with HS dispersed large soil aggregates and bound small ones, thus increasing the share of valuable 1-0.25 mm aggregates (Novoskoltseva *et al.,* 2024).

Sorption of toxicants. In HM-spiked soil-polymer mixtures, formulations decreased the content of mobile Cu, Zn, Pb, and Cd species and mitigated the toxicity of HM for plants and the soil microbial community (Table 2). HYPAN macromolecules bind to the surface of soil particles via polyvalent metal ions, which generally contribute not only to the formation of stable soil aggregates, but also sorption of HM. HS absorbs HM due to the presence of acid functional groups. Also, it acts as a stimulator of soil biological activity and mitigates the toxic effects of pollutants (Yakimenko *et al.,* 2024).

Table 2. Content of HM in the ammonium acetate extract from soil-polymer mixtures with model contamination by Cu, Zn, Pb, and C data doses of 4 tentative allowable concentrations, % of the control. Letters indicate significant differences by the Tukey LSD-test ($p < 0.05$)

Treatment	Cu	Zn	Pb	Cd
Control	100 c	100 a	100 a	100 ab
HYPAN	88b	103 a	90 a	88 a
HS	75 a	101 a	95 a	91a
HYPAN-HS 1:1	77 a	91 abc	91 a	94 ab
HYPAN-HS 1:2	75 a	83 bc	90 a	92 a

Field test on arid land. Deposition of 1 wt.% aqueous HYPAN at a consumption rate of 2 L m^{-2} over the sandy soil resulted in protective polymer-soil coatings on soil surface, which provided almost 100% resistance of the soil coating to blowing loss for at least six months. No noticeable damage to the coatings after the rains (34 cases for 6 months) was found. In March of 2025, the HYPAN-treated plots showed a better vegetation cover compared to the control area, with virtually bare soil without HYPAN treatment in 2023. Thus, the two-year anti-erosion protection of soil was thus revealed.

CONCLUSIONS

The effects on soil hydrophysical properties were mainly governed by synthetic PE, whereas the effects on soil chemical and biological properties were influenced by HS. The advantages of two-component compositions compared to individual polymers are determined by the limiting factor for the sustainable soil functioning (hydro-physical properties, humus status, level of contamination, etc.).

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was carried out with the support of the project "Development and use of polymeric ameliorants for regenerative agriculture" (the agreement between the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and Lomonosov Moscow State University No. 075-15-2025-658 dated 20/08/2025).

BIBLIOGRAPHY

Carmona-Ribeiro, A.M. & de Melo Carrasco, L.D. (2013). Cationic antimicrobial polymers and their assemblies. *Int J Molecular Sci,* 14:9906-9946

Delgado, M.Z., Aranda, F.L., Hernandez-Tenorio, F., Garrido-Miranda, K.A., Meléndrez, M.F. & Palacio, D.A. (2024). Polyelectrolytes for environmental, agricultural, and medical applications. *Polymers*, 16(10):1434.

Jindo, K., Olivares, F.L., Malcher, D.J.D.P., Sánchez-Monedero, M.A., Kempenaar, C. & Canellas, L.P. (2020). From lab to field: role of humic substances under open-field and greenhouse conditions as biostimulant and biocontrol agent. *Front Plant Sci*.,11: 530151. https://doi. org/10. 3389/ fpls.2020. 00426.

Novoskoltseva, O.A., Panova, I.G., Loiko, N.G., Nikolaev, Y.A., Litmanovich, E.A. & Yaroslavov, A.A. (2021). Polyelectrolytes and polycomplexes for stabilizing sandy grounds. *Polymer Science, Series B*, 63(5):488-495 https://doi.org/10.1134/S1560090421050092.

Novoskoltseva, O., Panova, I., Titkina, K., Sinelnikova, D., Yakimenko, O., Gruzdenko, D., Stepanov, A. & Yaroslavov, A. (2024). Binary soil ameliorants composed of synthetic polyanion and natural humates. *Polymer Science, Series B*, 66(4), 570-579. https://doi.org/10.1134/S1560090424601353

Panova, I.G., Ilyasov, L.O. & Yaroslavov, A.A. (2021). Polycomplex formulations for the protection of soils against degradation. *Polymer Sci Ser C*, 63(2): 237-248.

Sikder, A., Pearce, A.K., Parkinson, S.J., Napier, R. & O'Reilly, R.K. (2021). Recent trends in advanced polymer materials in agriculture related applications. *ACS Applied Polymer Materials* 3(3): 1203-1217.

Yakimenko, O., Ziganshina, A., Terekhova, V. Panova I., Gladkova M., Timofeev M. & Yaroslavov A. (2022). Ecotoxicity of polyelectrolyte formulations in water and soil matrices. *Environ Sci Pollut Res* 29, 65489–65499 https://doi.org/10.1007/s11356-022-20449-x 10.1186/s40538-024-00679-6.

Yakimenko, O., Pozdnyakov, L., Kadulin, M., Gruzdenko, D., Panova, I. & Yaroslavov, A. (2024). Effects of binary polymer-humic soil amendments on soil carbon cycle and detoxication ability of heavy metal pollution. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 11(1), 174.

Zezin, A.B., Mikheikin S.V., Rogacheva, V.B., Zansokhova, M.F., Sybachin, A.V. & Yaroslavov, A.A. (2015). Polymeric stabilizers for the protection of soil and ground against wind and water erosion. *Advances in Colloid and Interface Sci* 226:17-23.

LA APLICACIÓN DE FERTILIZANTES AFFECTA EL DESARROLLO DE PLANTAS DE *Quercus magnolifolia* Y *Quercus laurina* EN CONDICIONES DE VIVERO

Nayeli Zepeda Aguilar [1]; René García Martínez[1]; Juan Carlos Montoya Jiménez[1]

[1] TECNM-TES Valle de Bravo, División de Ingeniería Forestal. Carretera Federal Valle de Bravo, km 30, Ejido San Antonio Laguna, 51200, Valle de Bravo, Méx.

Correo del autor de correspondencia: zepedanayeli18@gmail.com

RESUMEN

La fertilización es clave en la producción de plantas de calidad en viveros forestales. En este estudio se evaluó el crecimiento en diámetro y altura de plantas de dos especies de encino por efecto de la aplicación de distintos fertilizantes. Las plantas de *Quercus magnolifolia* se les aplicó: 1) compost de ovino a una dosis de 250 g planta^{-1} al momento del trasplante, 2) triple 16 (N-P-K) a dosis de 2 g planta^{-1} de manera mensual, 3) super fosfato de calcio triple a una dosis 250 mL planta^{-1} cada 15 días de una solución de 2 g L^{-1} de agua, 4) Multicote® (14N-14P-16K) a dosis de 3 g planta^{-1} al momento del transplante (Testigo). Las plantas de *Q. laurina* recibieron la aplicación de 1) Blaukorn® (12-8-16) a dosis de 2 g planta^{-1} de manera mensual, 2) Novatec® (15-3-20) a dosis de 250 mL planta^{-1} cada 15 días de una solución de 2 g L^{-1} de agua, 3) Foresta® (9-45-15) a dosis de 250 mL planta^{-1} cada 15 días de una solución de 2 g L^{-1} de agua (Testigo). Para evaluar diferencias entre tratamientos se utilizó un ANOVA y para identificar el mejor tratamiento se aplicó una prueba de Tukey. Se realizaron análisis de regresión para predecir el crecimiento en altura y diámetro de cada especie. Los procedimientos estadísticos se procesaron en el software R. El crecimiento de las especies fue similar tanto en altura como en diámetro, sin embargo, la aplicación de los fertilizantes afectó el desarrollo de estas variables en cada especie. En *Q. magnolifolia* la mayor altura se logró con Triple 16, mientras que la aplicación de superfosfato de calcio triple produjo el menor diámetro. En contraste, *Q. laurina* presentó mejor desarrollo en altura y diámetro con los fertilizantes Novatec® y Foresta®. Estos fertilizantes se utilizan actualmente para el manejo de la nutrición en la producción de plantas de encino en el vivero.

PALABRAS CLAVE: *Calidad de planta; encinos; nutrición vegetal; viveros forestales.*

INTRODUCCIÓN

La producción de plantas en viveros forestales forma parte de la cadena productiva de la madera y se utiliza en los procesos de reforestación y restauración de ecosistemas forestales (Andivia *et al*., 2021), por lo que es importante establecer experimentos relacionados con el manejo de la nutrición para encontrar las dosis que permitan optimizar el desarrollo de las plantas, como lo realizaron Martínez-Nevárez *et al*. (2023).

La fertilización es importante en el desarrollo de las plántulas, ya que la aplicación de esto tiene un efecto positivo inicial en el crecimiento de las plántulas (Insunsa *et al*., 2024).

En el vivero de la División de Ingeniería Forestal se producen distintas especies de plantas, entre ellas los encinos, que se utilizan para proyectos de reforestación en los bosques de la región del Valle de Bravo, Estado de México. Sin embargo, no existían planes de manejo de la nutrición y como consecuencia se obtenía planta de baja calidad que se reflejaba en bajas tasas de supervivencia en campo. Por lo tanto, el objetivo del trabajo fue evaluar el crecimiento en diámetro y altura de plantas de dos especies de encino por efecto de la aplicación de distintos fertilizantes, con la finalidad de mejorar la calidad de los árboles obtenidos en el vivero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del estudio. La investigación se realizó en las instalaciones del vivero de producción de planta forestal, de la División de Ingeniería Forestal del Tecnológico de Estudios Superiores de Valle de Bravo, Estado de México, ubicado en las siguientes coordenadas 380,875.39 metros de longitud este y 2,127,520.077 metros latitud norte.

Material Vegetal. Se trabajó con dos especies de encino: 1) *Quercus magnolifolia* y 2) *Quercus laurina*. Las semillas de *Q. laurina* fueron recolectadas en la localidad de San Sebastián el Grande, Amanalco y las de *Q. Magnolifolia* en el predio forestal del TESVB en Valle de Bravo. Ambos municipios del estado de México. La recolecta de semillas y germinación fue en septiembre de 2023. El trasplante de las plántulas germinadas se realizó en marzo de 2024.

Diseño del experimento. Para evaluar el efecto de los fertilizantes en el desarrollo de las plantas se aplicaron distintos tratamientos. A las plantas de *Q. magnolifolia* se aplicaron: 1) compost de ovino a una dosis de 250 g planta^{-1} al momento del trasplante, 2) triple 16 (N-P-K) a dosis de 2 g planta^{-1} de manera mensual, 3) super fosfato de calcio triple a una dosis 250 mL planta^{-1} cada 15 días de una solución de 2 g L^{-1} de agua y 4) Multicote® (14N-14P-16K) a dosis de 3 g planta^{-1} al momento del transplante. El tratamiento cuatro se tomó como Testigo. A las plantas de *Q. laurina* se aplicaron: 1) Blaukorn® (12-8-16) a dosis de 2 g planta^{-1} de manera mensual, 2) Novatec® (15-3-20) a dosis de 250 mL planta^{-1} cada 15 días de una solución de 2 g L^{-1} de agua y, 3) Foresta® (9-45-15) a dosis de 250 mL planta^{-1} cada 15 días de una solución de 2 g L^{-1} de agua.

El tratamiento tres se tomó como Testigo. El manejo de las plantas en vivero incluyó riego cada tercer día y control manual de malezas. El experimento se instaló bajo un diseño completamente al azar, considerando un árbol como unidad experimental con 25 repeticiones.

Variables y frecuencia de medición. Para evaluar el efecto de los tratamientos se midieron el diámetro (mm) y la altura (cm) de las plantas utilizando un vernier digital y un flexómetro marca Truper®. Las mediciones se realizaron de manera mensual a partir de abril de 2024.

Análisis de datos. Para evaluar diferencias entre tratamientos se utilizó un ANOVA y para identificar el mejor tratamiento se aplicó una prueba de comparación de medias de Tukey. A partir de las mediciones de altura y diámetro se realizaron análisis de regresión para predecir el crecimiento en altura y diámetro de cada especie. Los procedimientos estadísticos se procesaron en el software R.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El crecimiento de las especies fue similar tanto en altura como en diámetro (Figura 1 y Figura 2), sin embargo, la aplicación de los fertilizantes afectó el desarrollo es estas variables en cada especie. En estudios realizados en *Pinus greggii* se encontró que, aunque algunos fertilizantes optimizaron el desarrollo de variables morfológicas (altura y diámetro), no en todos los casos se favoreció la absorción de nutrimentos (Bautista-Ojeda *et al*., 2018).

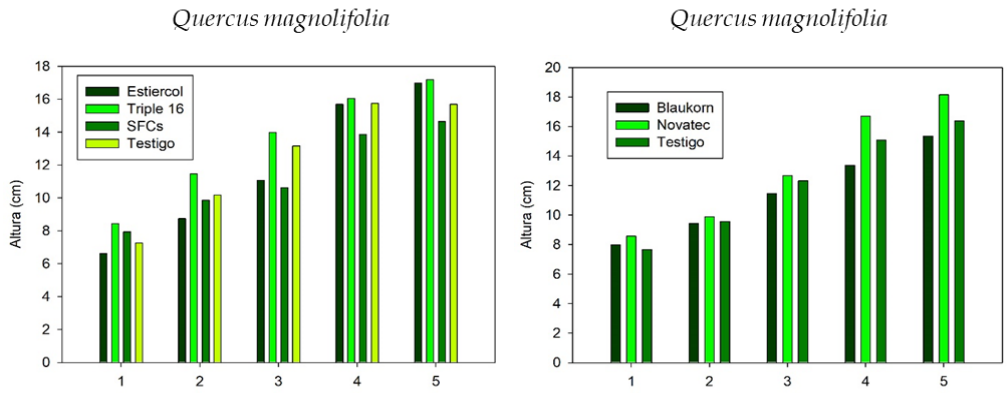
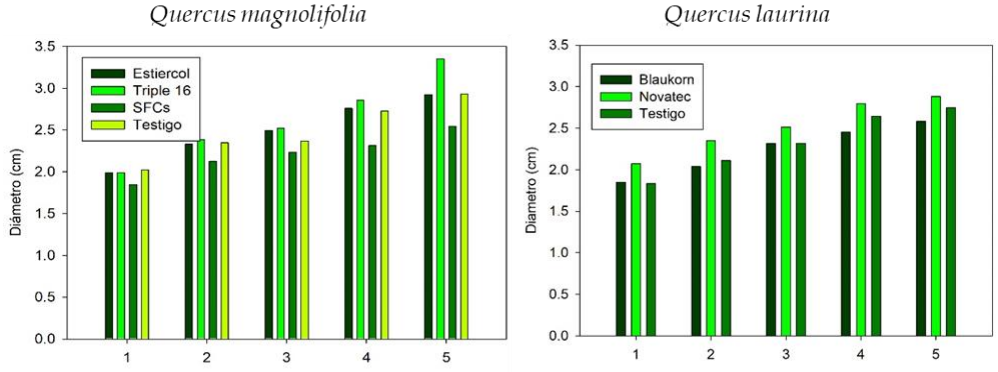


Figura 1. Evolución del crecimiento en altura de las plantas de *Q. magnolifolia* y *Q. laurina* por efecto de la aplicación de fertilizantes. Fechas de aplicación: 1) abril, 2) mayo, 3) junio, 4) julio y 5) agosto.

Figura 2. Evolución del crecimiento en diámetro de las plantas de *Q. magnolifolia* y *Q.*



laurina por efecto de la aplicación de fertilizantes. Fechas de aplicación de nutrientes: 1) abril, 2) mayo, 3) junio, 4) julio y 5) agosto.

La aplicación de fertilizante Triple 16 favoreció el desarrollo en altura de *Q. magnolifolia.* En contraste, *Q. laurina* respondió mejor a los fertilizantes Novatec® y Foresta® (Testigo) para esta misma variable. El suministro de N favorece el crecimiento en altura de las plantas y estos fertilizantes aportan cantidades adecuadas de este nutriente esencial.

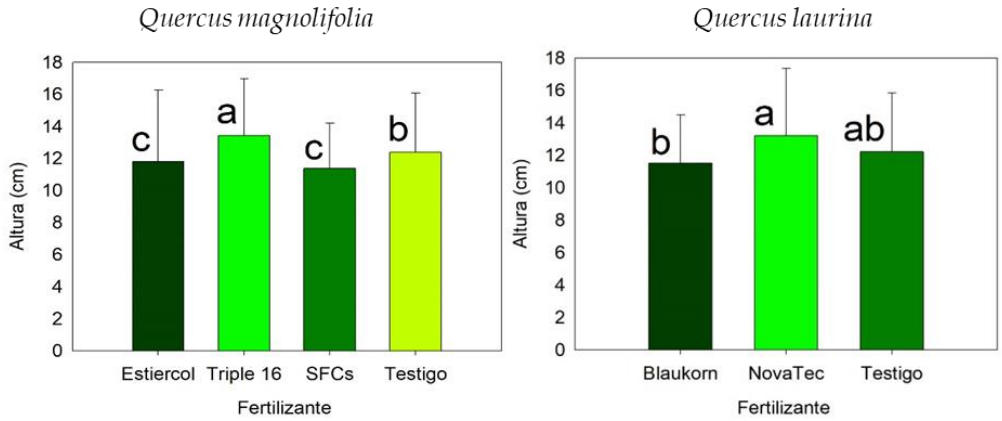
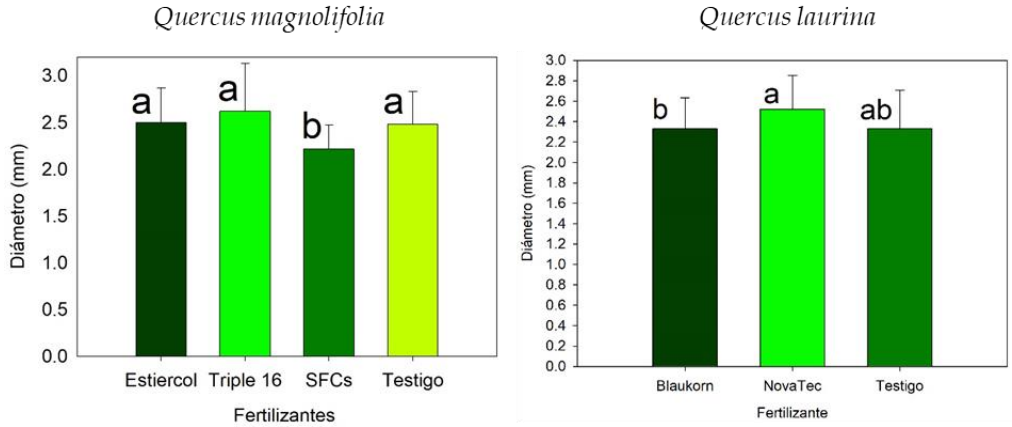


Figura 3. Comparación del crecimiento en altura de las plantas de *Q. magnolifolia* y *Q. laurina* por efecto de la aplicación de fertilizantes. Columnas con letras distintas son significativas ($p < 0.05$).

Figura 4. Comparación del crecimiento en diámetro de las plantas de *Q. magnolifolia* y



Q. laurina por efecto de la aplicación de fertilizantes. Columnas con letras distintas son significativas ($p < 0.05$).

El menor crecimiento en diámetro observado en las plantas de *Q. magnolifolia* al aplicar superfosfato de calcio triple se debe a que este fertilizante solo aporta fósforo (P) y calcio (Ca). Los demás fertilizantes utilizados, al contener una mayor variedad de nutrimentos, especialmente N, P y K, favorecieron un desarrollo más robusto.

En el caso de *Q. laurina*, el mejor desarrollo en diámetro se atribuye a la aplicación de Novatec. Este fertilizante de liberación controlada optimiza la absorción de nutrientes y minimiza la lixiviación de nitratos, a diferencia de Blaukorn® y Foresta®, que están diseñados para plantas que requieren una liberación de nutrientes más rápida. Los fertilizantes de liberación controlada, al aportar los nutrientes gradualmente al suelo, aseguran una absorción más eficiente y sostenida por parte de las plantas (Camarena-Yupanqui *et al*., 2024).

Al relacionar el diámetro vs altura de los árboles de cada especie se observó un mejor ajuste en las plantas de *Q. magnolifolia* comparado con *Q. laurina*, donde la dispersión de los datos fue mayor (Figura 5).

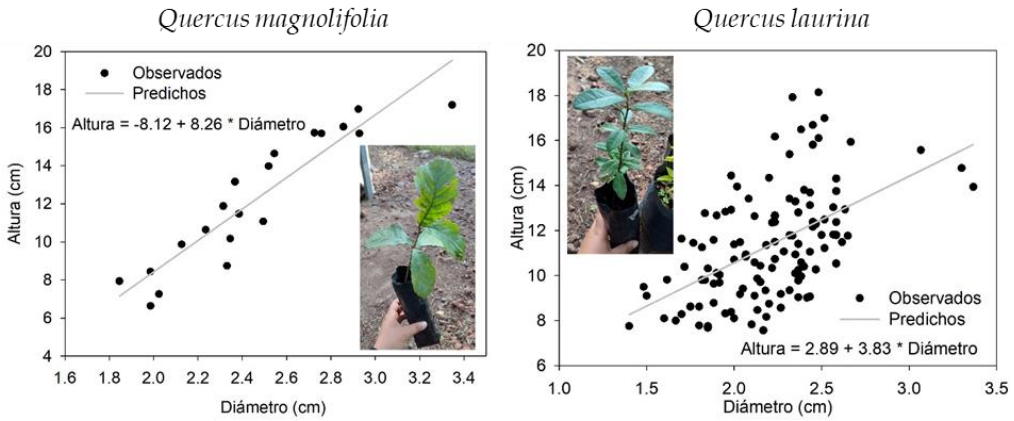


Figura 5. Relación diámetro vs altura en plantas de *Q. magnolifolia* y *Q. laurina* por efecto de la aplicación de distintos fertilizantes.

CONCLUSIONES

Con la aplicación de los fertilizantes Triple 16 se favorece el desarrollo de altura en *Q. mangnolifolia* superando incluso al Testigo (Multicote®). En *Q. laurina*, NovaTec® resultó el mejor tratamiento pues se observaron las plantas más grandes superando al Testigo (Foresta®). En *Q. magnolifolia*, los tratamientos Testigo, Estiercol y Triple 16 generaron el mayor desarrollo en diámetro. En *Q. laurina* con el fertilizante Novatec® no superó al Testigo pero sí al Blaukorn ®. Las diferencias más notables se presentaron en la altura de los árboles y los resultados de este estudio se utilizan actualmente para el manejo de la nutrición en la producción de plantas de encino en el vivero forestal del TESVB que actualmente distribuye plantas a distintos municipios y ejidos del Estado de México.

BIBLIOGRAFÍA

Andivia, E., Villar-Salvador, P., Oliet, J. A., Puértolas, J., Dumroese, R. K., Ivetić, V., Molina-Venegas, R., Arellano, E.C., Li, G. & Ovalle, J. F. (2021). Climate and species stress tolerance modulate the higher survival of large seedlings in forest restoration worldwide. *Ecological Applications*, 31(6), e02394. https://doi.org/10.1002/eap.2394.

Bautista Ojeda, G. I., Prieto Ruíz, J. Á., Hernández Díaz, J. C., Basave Villalobos, E., Goche Télles, J. R. & Montiel Antuna, E. (2018). Crecimiento de Pinus greggii Engelm. bajo diferentes rutinas de fertilización en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(49). https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.171.

Camarena-Yupanqui, R. C., Orellana-Mendoza, E., Bernaola-Paucar, R. M., Ames-Martínez, F. N., Loardo-Tovar, H. & Quispe-Melgar, H. R. (2024). Seedling production of Retrophyllum rospigliosiiin nurseries and potential reforestation areas using modeling techniques. *Forests*, 15(12), 2179. https://doi.org/10.3390/f15122179.

Innusa, B. N., Burney, O. T. & Jacobs, D. F. (2024). Response of Live Oak Regeneration to Planting Density, Fertilizer, and Mulch. *Forests*, *15*(9), 1594. https://doi.org/10.3390/f15091594.

Martínez-Nevárez, L. E., Prieto-Ruíz, J. A., Sigala-Rodríguez, J. A., García-Rodríguez, J. L., Martínez-Reyes,M., Carrillo-Parra, A. & Domínguez-Calleros, P. A. (2023). Crecimiento y Eficiencia en el Uso de Nutrientesde Plantas de Pinus cooperi C. E. Blanco Producidas en Vivero con un Fertilizante de Liberación Controlada.*Terra Latinoamericana*, 41, 1-12.e1707. https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1707.

Olvera, C. P. P., Sotelo, R. D. & Guerrero Cuacuil, E. (2000). Aprovechamiento de la madera de encino en México. *Madera y Bosques*, 6(1), 3–13. https://doi.org/10.21829/myb.2000.611338.

PROPIEDADES DE VERMICOMPOSTAS A BASE DE COMBINACIONES DE ESTIÉRCOL Y RESIDUOS DE CALABAZA (*Cucurbita* spp.)

Emanuel González Sánchez[1]; Alfredo Lara Herrera[1]; Martha Patricia España Luna[1]; Rodolfo de la Rosa Rodríguez[2]; Julio Lozano Gutiérrez[1]; José Manuel Pinedo Espinoza[1]

[1] Unidad Académica de Agronomía, Universidad Autónoma de Zacatecas, Carretera Federal 54 Zacatecas-Guadalajara km 15.5, CP 98170, Cieneguillas, Zacatecas, México.
[2] Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Carretera Federal 54 Zacatecas-Guadalajara km 15.5, CP 98170, Cieneguillas, Zacatecas, México.

Correo del autor de correspondencia: alara204@gmail.com

RESUMEN

Los suelos del estado de Zacatecas presentan una reducción gradual del contenido de materia orgánica. En esta entidad y particularmente en la zona centro-norte es importante el ganado caprino y ovino, también se destaca en la producción de calabaza, con el fin de aprovechar la pepita, el resto del fruto es desechado. El objetivo del trabajo fue determinar el efecto de la combinación de estiércoles de ganado ovino y caprino y las proporciones de estos con residuos de calabaza en las propiedades físicas y químicas de las vermicompostas generadas. Se llevó a cabo un experimento factorial 3x4, donde se evaluaron el factor (EST) (caprino, ovino y caprino+ovino) y el factor proporción de EST con calabaza (100:0, 75:25. 50:50 y 25:75). Al final del proceso de vermicompostaje se determinaron las propiedades físicas (humedad, porosidad, capacidad de retención de agua y densidad aparente) y químicas (pH, conductividad eléctrica, concentración de nitrógeno total, fósforo y potasio). Se presentaron diferencias en las variables evaluadas por efecto del factor EST, el nivel que presentó mejores propiedades fue la combinación (1:1) de los ESTs de caprino:ovino. Pero los cambios más importantes se presentaron en el factor proporción estiercol:calabaza. La combinación que presentó las mejores propiedades físicas y químicas fue con las proporciones 100:0 y 75:25.

PALABRAS CLAVE: *Conductividad eléctrica; concentración de macronutrimentos; Eisenia andrei; pH; propiedades físicas y químicas.*

INTRODUCCIÓN

La materia orgánica del suelo (MOS) mejora las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de los suelos (Álvarez *et al*., 2019). La MOS en los suelos del estado de Zacatecas tiene una tendencia decreciente (Echavarria *et al*., 2023). Existe poca disponibilidad de materiales orgánicos para generar abonos, los pocos materiales de origen orgánico que se tienen deben ser aprovechados al máximo.

Zacatecas ocupa el 2° lugar nacional en cabezas de ganado caprino y el 5° en ganado ovino (SIAP, 2023). En la producción de semilla (pepita) de calabaza, en condiciones de temporal, ocupó el 3° lugar (SIAP, 2023), pero el 95% del fruto es desechado. Se requiere generar información sobre la combinación de estos materiales orgánicos para producir

vermicomposta (VCO). Por tal motivo, se planteó el presente trabajo, con el objetivo de obtener la combinación de EST y residuos de calabaza con la cual se mejoren las propiedades de la VCO.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en la localidad de Loreto, Río Grande, Zacatecas. Ubicado en las coordenadas 23.847 latitud norte y -103.003 longitud oeste, con una altura de 1883 msnm. Las determinaciones físicas y químicas de las VCOs se realizaron en el laboratorio de Nutrición Vegetal de la UAA-UAZ.

Los residuos de frutos de calabaza *Cucurbita* spp. fueron colectados de la extracción del implemento cosechador de la semilla, el 18 de noviembre de 2023; en la localidad de Charco Blanco, Sombrerete, Zacatecas, con ubicación geográfica 23.855 latitud norte y -103.645 de longitud oeste, con una altura de 2243 msnm.

La recolecta de los ESTs se realizó en la localidad de Loreto, Río Grande, Zacatecas; el tiempo desde su generación fue menor a cuatro meses, se recolectó semanalmente durante ese periodo, y se apiló en estercoleros de donde fue usado para los tratamientos. La lombriz que se utilizó fue *Eisenia andrei*.

Se llevó a cabo un experimento con arreglo factorial de los tratamientos 3 x 4, el factor "A" estuvo constituido por tres fuentes de EST caprino (C), ovino (B) y caprino+ovino 1:1 (CB); el factor "B" se constituyó por cuatro (proporciones) niveles de mezcla de EST con residuos de frutos de calabaza (100-0, 75-25, 50-50 y 25-75), se realizó esta mezcla con base en peso/peso (p/p) con la humedad natural (peso húmedo) de cada material, cada uno con tres repeticiones en bloques al azar, obteniendo un total de 36 unidades experimentales. Cada tratamiento con un volumen de 0.3 m^3 de sustrato-alimento contenido por un molde de una película plástica impermeable, con dimensiones de 1 m por lado y 0.3 m de alto; y aproximadamente 1000 individuos de *E. andrei*. Los tratamientos fueron constituidos según la metodología de Limachi (2018).

Al uniformizar la mezcla de los materiales correspondientes a cada tratamiento y ser depositados en sus contenedores, se humedecieron mediante riegos diarios por aspersión hasta obtener una humedad de 75-85%. A las dos semanas de homogeneizar la humedad y temperatura, se agregaron las lombrices en cada tratamiento.

El vermicompostaje se realizó durante 90 días, bajo sombra con riegos interdiarios. La VCO producida se secó al aire, a 30 – 35% de humedad y se tamizó con malla 10, para su estudio. La cosecha de la VCO se realizó cuando la fase de maduración culminó, la temperatura de las pilas estuvo próxima a la del entorno, no emitió olores desagradables, el color cambió a negro, estructura suelta, estas propiedades describen que el proceso de vermicompostaje estuvo completo; a los 90 días del proceso se tomaron las muestras para evaluar las propiedades.

Las propiedades físicas evaluadas fueron: Humedad, porosidad de aireación (Po), capacidad de retención de agua (CRA) y densidad aparente (Da). Las propiedades químicas determinadas fueron: pH y conductividad eléctrica (CE), determinadas en una relación 1:5 (p:v, VCO:agua). La determinación de nitrógeno total (Nt) fue por el método semimicro-Kjeldahl modificado para incluir NO_3^-; fósforo por el método colorimétrico de

fosfovanadomolíbdeno y potasio mediante espectrofotometría de emisión atómica (Alcantar *et al*., 1992).

A los resultados obtenidos se les aplicó un análisis de varianza, comparación múltiple de medias con LSD Fisher ($p < 0.05$), de acuerdo con el arreglo factorial de los tratamientos, con el programa InfoStat versión 2020 (Di Rienzo *et al*., 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tipo de EST presentó diferencias en Hu, Po, pH y CE; las últimas tres variables fueron menores ($p < 0.05$) en las VCOs a base de EST de ganado caprino, y en general, fueron mayores con la combinación de ambos ESTs. La Po tuvo comportamiento opuesto a la Hu (Cuadro 1). Valores de humedad similares fueron presentados por Durán y Henríquez (2010), con VCO a base de EST vacuno, el cual presentó una consistencia suelta y friable con un contenido de humedad del 68%; también presentan valores similares a los obtenidos con la combinación de ambos ESTs (CB) para el porcentaje de porosidad de aireación (Po) 31.8%.

Cuadro 1. Efecto del tipo de estiércol: caprino (C), ovino (B), caprino + ovino (CB), en las propiedades físicas y químicas de las vermicompostas.

Factor A	Hu	Po	pH	CE ($dS \cdot m^{-1}$)	Nt	P	K
C	61a †	28.19c	8.45b	6.79b	1.46a	0.58a	5.77a
B	58.93b	29.32b	8.63a	7.52ab	1.46a	0.57a	4.74a
CB	60.37ab	30.3a	8.64a	7.79a	1.36a	0.63a	4.86a
DMS	1.783	0.982	0.155	0.850	0.144	0.132	1.472

Hu = Humedad, Po = Porosidad, CE = Conductividad eléctrica, Nt = Nitrógeno total, P = Fósforo, K = Potasio; con excepción de la CE, las variables son reportadas en porcentaje, † = Cifras seguidas con la misma letra en cada columna son iguales ($p \leq 0.05$), DMS = Diferencia mínima significativa.

El pH y la CE fueron menores en las VCOs a base de EST de ganado caprino (Cuadro 1), lo cual presentó correlación positiva con la Po. Colín *et al*. (2019), reportan CE de 8.5 dS m^{-1} y pH de 7.2 para VCO elaborada con EST caprino. Domínguez y Pérez (2011) muestran resultados de VCO a base de EST vacuno con pH 8.1, CE de 6.6 $dS \cdot m^{-1}$, 1.5% Nt, 0.22% P y 0.57% K. La NMX-FF-109-SCFI-2008 indica que los materiales provenientes de zonas áridas pueden tener pH mayor a 7; el rango de la variable Nt para la VCO comercial oscila de 1 a 4%. Los resultados obtenidos se encuentran dentro de esos rangos. Las fuentes de EST evaluadas no presentaron diferencias en las concentraciones de los macronutrimentos primarios en las VCOs generadas, lo cual indica que la menor ($p < 0.05$) CE en las VCOs a base de EST de ganado caprino se debe a otros elementos minerales (iones).

El factor B, correspondiente a la evaluación de las proporciones de EST y restos de fruto de calabaza mostró diferencias significativas en las propiedades físicas y químicas, con excepción del pH (Cuadro 2); de las propiedades que mostraron diferencias, con excepción de la Po, mostraron mayor magnitud al aumentar la proporción de EST, sin embargo, con 25% de calabaza no disminuyeron estas propiedades, sólo la CE sí fue

menor ($p < 0.05$). La CE presentó alta correlación positiva con las concentraciones minerales de N, P y K, aunque las concentraciones de estos nutrimentos no fueron diferentes en las VCOs ($p < 0.05$); estos resultados indican que el aporte de nutrimentos minerales es mayor por efecto del EST que por la calabaza. Hernández *et al*. (2008), reportan CRA de 35.2% de VCOs a base de EST de bovino y palma (*Elaeis guineensis*), también disminuyó esta variable al disminuir la proporción de EST.

Lugo *et al*. (2017), evaluaron mezclas de lodo residual y EST de equino en las mismas proporciones a las de la presente investigación, por medio de vermicomposteo, encontraron que el pH varió entre 8.46 y 6.87, tendió a disminuir ligeramente al avanzar el proceso, pero no hubo diferencias por efecto de las proporciones, lo cual tiene similitud con los resultados obtenidos en este trabajo. Hernández *et al*. (2006), caracterizaron su VCO generada a base de EST de bovino, reportan concentraciones promedio (%) de: 0.57 y 1.8 para fósforo y potasio, pH 7.63 y conductividad eléctrica 3.09; valores inferiores a los obtenidos en el presente trabajo.

Cuadro 2. Efecto de la proporción de estiércol utilizado en la combinación con restos de fruto de calabaza (Factor B) en las propiedades físicas y químicas de las vermicompostas.

Factor B	Hu	Po	CRA	pH	CE ($dS \cdot m^{-1}$)	Nt (%)	P	K
100	62.9a †	29.10b	35.16a	8.48a	8.49a	1.64a	0.64a	5.67a
75	61.66ab	30.24a	33.95ab	8.51a	7.18bc	1.53ab	0.63a	5.43a
50	59.64b	29.00b	33.06b	8.68a	7.50b	1.39b	0.57a	5.25a
25	56.37c	28.73b	31.94c	8.62a	6.30c	1.14c	0.55a	4.14a
DMS	2.059	1.134	1.573	0.179	0.981	0.167	0.153	1.700

Hu = Humedad, Po = Porosidad, CRA = Capacidad de retención de agua, CE = Conductividad eléctrica, Nt = Nitrógeno total, P = Fósforo, K = Potasio; con excepción de la CE, las variables son reportadas en porcentaje, † = Cifras seguidas con la misma letra en cada columna son iguales ($p \leq 0.05$), DMS = Diferencia mínima significativa.

CONCLUSIONES

La combinación de los ESTs de ganado ovino y caprino presentó mejores propiedades físicas y químicas que las VCOs en forma individual y aún más que la de ganado caprino. Las concentraciones de N, P y K no fueron diferentes ante las tres fuentes de EST utilizadas.

La proporción en la combinación de EST y restos de fruto de calabaza que mostró propiedades físicas y químicas más favorables en las VCOs fue con 75% de EST y 25% de calabaza.

BIBLIOGRAFÍA

Alcantar, G.G., Etchevers, J.D. & Aguilar, A.A. (1992). Los análisis físicos y químicos, su aplicación en agronomía. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduadas. Montecillo, Estado de México. 125 p.

Álvarez, V.M., Largo, A., Iglesias, A.S. & Castillo, J. (2019). Calidad de compost obtenido a partir de estiércol de gallina, con aplicación de microorganismos benéficos. *Scientia Agropecuaria*, 10(3):353-361. http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.03.05

Colín-Navarro, V., Domínguez-Vara, I. A., Olivares-Pérez, J., Castelán-Ortega, O. A., García-Martínez, A., & Avilés-Nova, F. (2019). Propiedades químicas y microbiológicas del estiércol de caprino durante el compostaje y vermicompostaje. *Agrociencia*, 53(2):161-173.

Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., González, L., Tablada, M., Robledo, C.W. (2020). InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. http://www.infostat.com.ar

Domínguez, J. y Pérez, D. (2011). Desarrollo y nuevas perspectivas del Vermicompostaje. En: López-Mosquera M.E., Sainz-Osés M.J. Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola, Servizo de Publicacións e Intercambio Científico, Universidad de Santiago de Compostela, pp. 201-214.

Durán, L. & Henríquez, C. (2010). El vermicompost: su efecto en algunas propiedades del suelo y la respuesta en planta. *Agronomía Mesoamericana*, *21*(1):85-93. https://www.redalyc.org/pdf/437/43713870009.pdf

Echavarria-Chairez, F. G., Alvarado-Sabag, M. N., Serna-Perez, A., Medina-Garcia, G., & Casas-Flores, J. I. (2023). Acumulación y pérdida de suelo por erosión eólica en el norte de Zacatecas. *Terra Latinoamericana*, *41:1-14*. DOI: https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1649.

Hernández, J. A., Guerrero, F., Mármol, L. E., Bárcenas, J. M. & Salas, E. (2008). Caracterización física según granulometría de dos vermicompost derivados de estiércol bovino puro y mezclado con residuos de fruto de la palma aceitera. *Interciencia,* 33(9), 668-671. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000900010.

Hernández, J. A., Pietrosemoli, S., Faría, A., Canelón, R., Palma, R. & Fernández, J. M. (2006). Frecuencia de riego en el crecimiento de la lombriz (*Eisenia spp*.) y caracterización química del vermicompost. *Revista Científica UDO Agrícola*, *6*(1),20-26.

Lugo, J., Águila, P. D., Vaca, R., Casas-Hinojosa, I. & Yáñez-Ocampo, G. (2017). Abono orgánico elaborado con lodo residual y estiércol equino a través de vermicomposteo: una propuesta como mejorador de suelos. *Revista internacional de contaminación ambiental*, *33*(3), 475-484. https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.03.10.

SIAP. (2023). SIAP. Recuperado en junio de 2024, de https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119.

CALIDAD DEL SUELO EN PLANTACIONES DE AGAVE AZUL (*Agave tequilana* Weber) EN LA SUBCUENCA CHAPALA, MICHOACÁN

Víctor Eduardo Esparza Torres[1]; Gustavo Cruz Cárdenas[1]; Salvador Ochoa Estrada[1]; José Teodoro Silva García[1], Sergio Martínez Trinidad[2]; Sigifredo López Díaz[1]

[1] Instituto Politécnico Nacional, CIIDIR Unidad Michoacán, Jiquilpan, Michoacán, México.
[2] Colegio de Postgraduados, Campus Puebla, Santiago Momoxpan, Municipio de San Pedro Cholula, Puebla 72760, México.

Correo del autor de correspondencia: vesparzat2300@alumno.ipn.mx

RESUMEN

La calidad del suelo representa su capacidad para sostener la productividad vegetal y animal, conservar la calidad del agua y del aire, y favorecer la vida de los organismos. Este estudio evaluó dicha calidad en suelos cultivados con *Agave tequilana Weber* en la subcuenca Chapala, bajo la hipótesis de que esta disminuye conforme aumenta la edad del cultivo. Se tomaron muestras en 20 sitios con cultivo de agave y cuatro en suelos con vegetación no perturbada (testigo), todos en Leptosoles (Cambic). En el laboratorio se analizaron propiedades como materia orgánica, conductividad eléctrica, pH, densidad aparente, textura, capacidad de intercambio catiónico y nutrientes (N, P, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} y K^{+}), siguiendo la NOM-021-SEMARNAT-2000. Se aplicó un diseño completamente al azar para identificar variables significativas. Para evaluar la calidad del suelo se usaron tres enfoques: el Subíndice de Uso Sustentable del Suelo (SUSS), análisis de componentes principales (ACP) con clúster, y el Índice de Calidad del Suelo (SQI). El análisis factorial indicó que el calcio, pH y porcentaje de arcilla tuvieron diferencia significativa. El SUSS clasificó los suelos como de calidad "aceptable" y "buena"; el ACP y el clúster formaron tres grupos: "bueno", "aceptable" y "sensible"; mientras que el SQI generó una clasificación más amplia: "bueno", "aceptable", "sensible" y "pobre". Estos resultados reflejan el impacto del cultivo de agave en la calidad del suelo y la utilidad de múltiples metodologías para su evaluación integral.

PALABRAS CLAVE: *Fertilidad del suelo; indicadores de calidad del suelo; manejo del suelo.*

INTRODUCCIÓN

México es considerado el centro de origen del género *Agave*, con alrededor del 75% de las especies del continente y un alto nivel de endemismo (Morales-Maldonado *et al*., 2022). Entre ellas, *Agave tequilana* Weber tiene una relevancia cultural y económica destacada, siendo base de la industria del tequila y generando empleos en regiones como Jalisco y Michoacán (Fregoso-Zamorano *et al*., 2023). No obstante, el rápido incremento del cultivo ha provocado preocupaciones sobre su impacto en la calidad del suelo, elemento clave para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas (Andrews *et al*., 2004). En la subcuenca Chapala porción Michoacán, donde se han registrado 1038 ha plantadas de *A. tequilana* (SIAP, 2022), el monocultivo ha reemplazado cultivos tradicionales como maíz, sorgo y frijol, alterando el uso del suelo y generando posibles impactos en sus

propiedades fisicoquímicas. Para evaluar estos impactos, se pueden utilizar indicadores de calidad del suelo (SQI) y análisis multivariados como los análisis de componentes principales (ACP), que permiten sintetizar múltiples variables en índices comparables entre sitios (Khaleel y Sarmamy, 2023; Zhang *et al.,* 2022; Ozlu *et al.,* 2022). Entre los parámetros más comunes utilizados están: pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad aparente, textura, nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y bases como calcio, magnesio y sodio (Castillo-Valdez *et al.,* 2021). El objetivo del trabajo fue determinar la relación entre la edad del cultivo y la calidad del suelo, es decir, que su prolongada presencia deteriora sus propiedades fisicoquímicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se llevó a cabo en cinco municipios del estado de Michoacán: Villamar, Jiquilpan, Venustiano Carranza, Cojumatlán de Régules y Sahuayo de Morelos. Esta región, ubicada entre las coordenadas 19°61'50.38" y 20°23'57.43" N y 102°22'43.47" y 103°09'29.18" W, abarca una superficie de 1078 km² con altitudes entre 1,529 y 2,154 msnm (INEGI, 2008). El clima predominante es templado subhúmedo con lluvias en verano y una precipitación anual entre 700 y 1000 mm (García, 1998). Los suelos principales son Leptosoles (Cambic), Vertisoles (Pellic) y Luvisoles (Vertic) (IUSS Working Group WRB, 2015). Los tipos de vegetación son selva baja caducifolia, pastizal, bosque templado y matorral subtropical (INEGI, 2011).

Se seleccionaron 24 sitios de muestreo: 20 en parcelas de *A. tequilana* de uno a cinco años (cuatro por año) y cuatro en suelo no perturbado como testigo (área natural cercana). Las muestras se tomaron a tres profundidades (0–20, 20–40 y 40–60 cm), recolectando 2 kg de suelo por profundidad. Se analizaron propiedades como pH, materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad aparente (DA), textura y nutrientes (N, P, K, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}), siguiendo la NOM-021-SEMARNAT-2000.

La calidad del suelo fue evaluada mediante tres metodologías complementarias. El SUSS consistió en la normalización de los parámetros a una escala de 0 a 1, y calculando la calidad del suelo con la fórmula:

$$SUSS = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_i}{\mathrm{n}}$$

Donde: **P=** representa el promedio de los valores normalizados de los parámetros; **i** corresponde a cada indicador o parámetro evaluado; **n** indica la cantidad total de parámetros considerados en el análisis.

Posteriormente, se aplicó un ACP para identificar las variables más influyentes, reduciendo la dimensión de los datos y agrupando propiedades correlacionadas. Con base en estos resultados, se realizó un análisis de clúster para clasificar los sitios según similitud en sus características fisicoquímicas.

Finalmente, se calculó un Índice de Calidad del Suelo (SQI) mediante la suma ponderada de los valores normalizados:

$$SQI = \sum_{i=1}^{n} (W_i \times S_i)$$

donde W_i representa el peso obtenido del ACP y S_i el valor normalizado. Se aplicaron tres criterios de normalización: "más es mejor", "menos es mejor" y "valor óptimo".

El análisis estadístico incluyó un diseño completamente al azar con cinco tratamientos (edades de plantación) y un testigo, aplicando ANOVA y comparación de medias para evaluar diferencias significativas entre los grupos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En función de las variables significativas el SUSS permitió clasificar los suelos como "bueno" y "Aceptable" teniendo un 58% de los predios clasificados como "bueno" y un 42% de los predios como "aceptable", esta metodología facilita identificar condiciones de suelo buenas, aceptables o deterioradas como lo indica SAGARPA, (2012) estudios previos han demostrado la correcta clasificación de esta metodología en diferentes investigaciones como la de Reyes-Chávez *et al.,* (2024).

En cuanto a los resultados obtenidos de ACP y clúster coinciden con lo reportado por Zang *et al.* (2022) quienes demostraron que la utilización de un conjunto mínimo de datos incrementa la robustez del índice de calidad del suelo. De manera similar Valle & Carrasco, (2018) encontraron que en los suelos estudiados en Chile, las variables seleccionadas mediante ACP (pH, materia orgánica, P, K) ofrecieron una mayor capacidad de diferenciación entre usos del suelo que todas aquellas variables que se eligieron al inicio del estudio, esto también coincide con lo encontrado por Mora-Orozco *et al.,* (2020) quienes, al evaluar suelos cultivados con agave, destacaron estos elementos más aparte del calcio y P, como determinantes en la calidad edáfica.

Es importante reconocer que el SQI no representa un valor absoluto ni universal, su interpretación debe ajustarse al contexto específico del estudio, tal como lo señalan Andrews *et al.* (2004). El desarrollo de índices de calidad del suelo debe centrarse en la selección de variables sensibles al manejo agrícola (Sánchez-Guzmán *et al.,* 2024). En el indicador de SQI la clasificación "buena" tiene a la plantación de dos años con un mayor porcentaje (22%), la clasificación "aceptable" los predios que tiene mayor presencia es la plantación con tres años de plantación 33.33%, mientras que, en la clasificación de "sensible" los predios de cinco años son los que predominan con un 50%. Por último, en la clasificación "pobre" la mayor presencia de los suelos fueron los de cuatro.

CONCLUSIONES

Las variables más influyentes en la calidad del suelo fueron pH, arcilla y calcio. La combinación de ACP y análisis clúster resultó la metodología más efectiva, mostrando una separación moderada entre grupos: los suelos jóvenes y no perturbados se asociaron con mayor calidad, mientras que los de mayor edad se agruparon en el nivel más bajo.

BIBLIOGRAFÍA

Andrews, S.S., Karlen, D.L. & Cambardella, C.A. (2004). The Soil Management Assessment Framework: A Quantitative Soil Quality Evaluation Method. http://curveexpert.webhop.biz/

Castillo-Valdez, X., Etchevers, J.D., Hidalgo-Moreno, C.M.I. & Aguirre-Gómez, A. (2021). Soil quality evaluation: Generation and interpretation of indicators. Terra Latinoamericana, 39. https://doi.org/10.28940/TERRA.V39I0.698.

Fregoso Zamorano, B., Mancilla Villa, O.R., Guevara Gutiérrez, R.D., Moreno Hernández, A., Figueroa Bautista, P., Can Chulim, Á., Hernández Vargas, O., Cruz Crespo, E., Ortega Escobar, H.M., Khalil Gardezi, A. & Villalvazo-López, V.M. (2023). Caracterización edafológica con cultivo de agave azul (Agave tequilana Weber) en Edaphological characterization in a blue agave (Agave tequilana Weber) cultivation in Tonaya and Tuxcacuesco, Jalisco, Mexico. *Terra Latinoamericana*. https://doi.org/10.28940/terra

INEGI. (2008). Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Unidades climáticas.

INEGI. (2011). CARTA USO DEL SUELO Y VEGETACIÓN 1: 250 000 *serie VI Colima E13 - 3*.

IUSS Working Group WRB, (2015). Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106. FAO, Roma. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/dea292cb-370d-46c7-a44d-59a617953c3b/content.

Morales Maldonado, E.R., Gutiérrez Rojas, M., Holguín Peña, R.J., Ruiz Juárez, D., Vega Chávez, J.L. & Reyes Godoy, A.C. (2022). Effect of Nitrogen, Phosphorus and Potassium on regional organic substrates in Agave salmiana production in Huichapan, Hidalgo, Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 24:203 219. https://doi.org/10.56890/jpacd.v24i.511.

Mora-Orozco, F., Flores-Garnica, J.G., Vega-Ramírez, L.M., González-Acuña, I.J., Nápoles-Armenta, J. & Martínez-Orozco, E. (2020). Total Organic Carbon Assessment in Soils Cultivated with Agave tequilana Weber in Jalisco, Mexico. https://doi.org/10.3390/su13010208.

Ozlu, E., Gozukara, G., Acar, M., Bilen, S. & Babur, E. (2022). Field-Scale Evaluation of the Soil Quality Index as Influenced by Dairy Manure and Inorganic Fertilizers. *Sustainability,* 14(13). https://doi.org/10.3390/su14137593.

Reyes-Chávez, P.P., Cruz-Cárdenas, G., Pensado-Leglise, M.R. & Silva García, T. (2024). Calidad de Clases de Tierras Local en la Subcuenca Ganadera Chapala Porción Michoacán. *Terra Latinoamericana,* 42:1-11. https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1788.

SAGARPA. (2012). Subíndice de Uso Sustentable del Suelo Metodología de Cálculo.

Sánchez-Guzmán, A., Bedolla-Rivera, H.I., Conde-Barajas, E., Negrete-Rodríguez, M.L.X., Lastiri-Hernández, M.A., Gámez-Vázquez, F.P. & Álvarez-Bernal, D. (2024). Corn Cropping Systems in Agricultural Soils from the Bajio Region of Guanajuato: Soil Quality Indexes (SQIs). *Applied Sciences,* 14(7). https://doi.org/10.3390/app14072858.

Valle, S.R. & Carrasco, J. (2018). Soil quality indicator selection in Chilean volcanic soils formed under temperate and humid conditions. *Catena,* 162:386–395. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.10.024.

Zhang, Y., Wang, L., Jiang, J., Zhang, J., Zhang, Z. & Zhang, M. (2022). Application of soil quality index to determine the effects of different vegetation types on soil quality in the Yellow River Delta wetland. Ecological Indicators, 141. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109116.

FERTILIZACIÓN ORGÁNICA, MINERAL Y COMBINADA DEL SISTEMA MAÍZ-FRIJOL INTERCALADO EN GUERRERO, MÉXICO

Lucia Juárez Rodríguez[1]; Jorge D. Etchevers Barra[1]; Claudia I. Hidalgo Moreno[1]; César San Martín Hernández; José I. Cortés Flores[1]; Mariela H. Fuentes Ponce[2]

[1] Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Programa de Edafología, Texcoco, Estado de México, C. P. 56264.

[2] Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, Departamento de Producción Agrícola y Animal, Ciudad de México, C. P. 04960.

Correo del autor para correspondencia: juarez.lucia@colpos.mx

RESUMEN

Son escasos los estudios que hay sobre el manejo racional de fertilizantes en Guerrero. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de las fuentes de fertilización en el rendimiento de maíz y frijol intercalados entre árboles jóvenes de aguacate, para realizar un uso más eficiente de la tierra y la fertilización. Se evaluaron cuatro fuentes de fertilizantes: mineral, orgánica, orgánico-mineral y convencional del productor, distribuidos en un diseño de bloques completos al azar generalizado con tres bloques. El rendimiento de grano de maíz y frijol intercalados manejados con fertilización orgánica-mineral fue similar al obtenido con fertilización mineral y convencional del productor, lo que constituye una alternativa viable para mejorar la eficiencia del uso de fertilizantes en el sistema de cultivo intercalado en la zona Me'phaa de Atlixtac, Guerrero.

PALABRAS CLAVE: *Fertilización*; *Me'phaa; MIAF; región montaña*.

INTRODUCCIÓN

Según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2023), en México los cultivos de maíz y frijol ocupan el 62% de la superficie de producción nacional (12,983,777 hectáreas). Estos dos cultivos se siembran en los 31 estados del país y son componentes básicos de la dieta alimenticia de la población mexicana en general y en particular en las zonas rurales. En el municipio de Atlixtac, Guerrero, los agricultores Me'phaa=tlapanecos trabajan en tierras de labor menores a 2 hectáreas, ubicadas en laderas con pendiente mayor a 50% de inclinación. Estos terrenos presentan deterioro en su calidad, particularmente por: la pérdida de su fertilidad, la erosión hídrica, el uso inadecuado de fertilizantes químicos y la quema de residuos de cosecha. Los rendimientos de maíz y frijol son bajos. El SIAP (2023) reporta un rendimiento promedio de 1.67 t ha^{-1} para maíz y 791 kg ha^{-1} para frijol. Los productores de esta zona reciben fertilizantes desde 1994 hasta 2018 del gobierno estatal. A partir del año 2019 por parte del gobierno federal con el "Programa de Fertilizantes para el Bienestar", reciben anualmente 300 kg de Fosfato Diamónico o DAP (18-46-00) y 300 kg de Urea (46-00-00). Sin embargo, no se ha dado atención a la asesoría y capacitación para el uso adecuado de estos fertilizantes.

Este proyecto se encuentra en su segundo año de desarrollo. En este sentido, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de las fuentes de fertilización en los

componentes de rendimiento de maíz y frijol intercalados entre árboles jóvenes de aguacate. Con esto se quiere optimizar el uso de la tierra y su fertilización.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio. Este trabajo se llevó a cabo en la comunidad de San Lucas Teocuitlapa, municipio de Atlixtac, estado de Guerrero, en un módulo de producción con el sistema agroforestal Milpa Intercalada con Árboles Frutales (MIAF-aguacatero), el cual se instaló el 12 de septiembre de 2023. Se encuentra a una altitud de 1390 msnm. El clima es semicálido subhúmedo (A)Cw2, con temperatura y precipitación media anual de 21°C y 1350 mm, respectivamente. Previamente se realizó una caracterización físico-química del suelo, en el cual las muestras se recolectaron a profundidad de 0-20 cm en una superficie de 1526 m^2.

Diseño experimental y tratamientos. Se utilizó el diseño de Bloques Completos al Azar Generalizado con tres bloques y 2 repeticiones por bloque (Steel y Torrie, 1986). Cada módulo MIAF-Aguacatero constituyó un bloque. En el Cuadro 1 se presentan los tratamientos evaluados.

Cuadro 1. Tratamientos de fertilización y densidad de población de cultivos componentes del sistema MIAF en Teocuitlapa Guerrero, México. 2023-2024.

Fuente de fertilización	Dosis $N\text{-}P_2O_5\text{-}K_2O$ (kg ha^{-1})	Densidad (plantas ha^{-1})	Cultivo
T1. Mineral completa	205-20-56		
T2. Orgánica	100% N con estiércol		Maíz DK-357
T3. Orgánica-mineral	50% N estiércol + 50% N urea	71,427	
T4. Convencional productor	914-657-00		
T1. Mineral completa	120-00-52		
T2. Orgánica	100% N con estiércol		
T3. Orgánica-mineral	50% N estiércol + 50% N urea	150,000	Frijol Pinto
T4. Convencional productor	180-460-00		
T1. Mineral completa	50-30-50		
T2. Orgánica	100% N con estiércol		Aguacate cv. Hass
T3. Orgánica-mineral	50% N estiércol + 50% N urea	606	
T4. Convencional productor	44-20-44		

Nota: La densidad de población de maíz aquí utilizada fue de prueba, ya que los productores en la región usan densidades de 55,555 plantas ha^{-1} y fertilizan con 416-345 kg ha^{-1} de $N\text{-}P_2O_5$.

Manejo agronómico. En un inicio el suelo se barbechó y surcó mediante tracción animal, después la siembra fue directa. El experimento se estableció en dos fases. La primera fase consistió en la delimitación del terreno, trazado de cepas de 40x40x40 cm a curvas de nivel (17 de agosto de 2023) y el trasplante de 96 árboles de aguacate 'Hass' en terreno con pendiente > 20% (12 de septiembre de 2023). En la segunda fase, se estableció la asociación maíz y frijol. El ciclo otoño-invierno 2023-2024 (OI) inició el 5 de noviembre de 2023 con la siembra de una variedad mejorada de maíz pepitilla V-236P a 62,500 plantas ha^{-1} y frijol pinto de mata a 125,000 plantas ha^{-1}. Sin embargo, bajo las condiciones climáticas del sitio de estudio este material no prosperó. El ciclo primavera-verano 2024

(PV) se desarrolló el 28 de junio de 2024 con el híbrido tropical de maíz DK-357 a 71,427 plantas ha^{-1} y el frijol pinto a 150,000 plantas ha^{-1}.

En maíz se aplicó todo el P, K y 1/3 parte de N a los 15 días después de la siembra (dds); los 2/3 restantes de N se aplicaron a los 40 dds. En los tratamientos de fertilización orgánica y combinada (T2 y T3) toda la dosis de estiércol se incorporó 22 días antes de la siembra. El productor aplicó 54 g de fosfato de amónico (DAP) por mata de maíz a los 15 dds y 44 g de urea a los 40 dds; mientras que en frijol aplicó 20 g de DAP por mata por única vez a los 15 dds. En el caso del aguacate, en el primer año se aplicó 25-15-25 kg ha^{-1} de N-P_2O_5- K_2O, en el segundo año dicha fórmula se duplicó y en el tercer año se triplicará, después se mantendrá constante.

Evaluación de variables agronómicas. El rendimiento de grano y biomasa seca aérea se expresó en superficie compacta t (0.5 ha)-1, es decir, se consideró la asociación maíz-frijol de mata, donde cada cultivo ocupó el 50% del área efectiva.

El frijol se cosechó a los 84 días de sembrado. Se evaluaron el rendimiento de grano ajustado a 14% de humedad, número de vainas normales por planta, número de semillas por vaina, peso de 100 granos y biomasa seca aérea. Mientras que, el maíz se cosechó a los 122 días después de sembrado. Se registró rendimiento de grano ajustado a 14% de humedad, rendimiento de grano por planta, longitud de mazorca, granos por mazorca (hileras x granos por hilera), índice de desgrane (peso del grano entre el peso de la mazorca), peso de 100 granos y biomasa seca aérea. En cultivos intercalados maíz-frijol se evaluó la eficiencia relativa de la tierra (ERT), calculada con la ecuación reportada por Mead y Willey (1980). Si la ERT es mayor que 1.0, el cultivo intercalado es más eficiente y viceversa.

Análisis estadístico. Se realizó un análisis de varianza de las variables evaluadas (SAS v. 9,0). Las variables con diferencia estadística se sometieron a la prueba de comparación múltiple de medias Tukey ($P \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización físico-química del suelo. El suelo del sitio experimental fue descrito como Leptosol. El análisis químico en la profundidad de 0-20 cm presentó contenido de 0.14%, 61, 122, 1860, 504 mg kg^{-1} de $N_{Kjeldahl}$, P_{-olsen}, K, Ca, Mg, respectivamente; textura franco arcilloso arenoso; conductividad eléctrica de 0.2 dS m^{-1}; materia orgánica de 3.1% y pH de 7.

Efecto de la fuente de fertilización en frijol de mata. En el ciclo de producción OI, la fertilización no mostró significancia en el rendimiento y sus componentes en frijol (Figura 1). Posiblemente el suelo está suministrando los nutrientes que demanda el frijol o está haciendo uso de los nutrientes suministrados al maíz en el ciclo anterior (Escalante y Kohashi, 1993). El resultado fue diferente en el ciclo PV, en donde la fertilización combinada (T3) incrementó significativamente el rendimiento de grano de frijol en un 31% respecto a la fertilización convencional del productor (T4) (304 kg 0.5 ha^{-1}), sin mostrar diferencias estadísticas con la fertilización mineral (T1) y orgánica (T2). Resultados similares fueron reportados por Zayas-Infante *et al*. (2019) y Jácome *et al*. (2013).

Se obtuvo significativamente mayor biomasa seca aérea del frijol con la fertilización convencional del productor (271 kg 0.5 ha^{-1}) y combinada (268 kg 0.5 ha^{-1}), sin presentar diferencia estadística con el mineral, respecto a la fertilización orgánica que obtuvo la media más baja (214 kg 0.5 ha^{-1}). Curiosamente, el T4 y T3 también presentaron ligeramente mayor número de semillas por vaina. Mientras que las fuentes de fertilización no mostraron diferencia estadística en el número de vainas por planta y peso de 100 granos (valores promedios = 4 vainas, 52 g).

Cabe mencionar que el rendimiento de grano en el segundo ciclo disminuyó de 925 a 350 kg 0.5 ha-1 (62% menos), debido a que las plantas se enfermaron por el exceso de lluvia que trajo el huracán John en 2024.

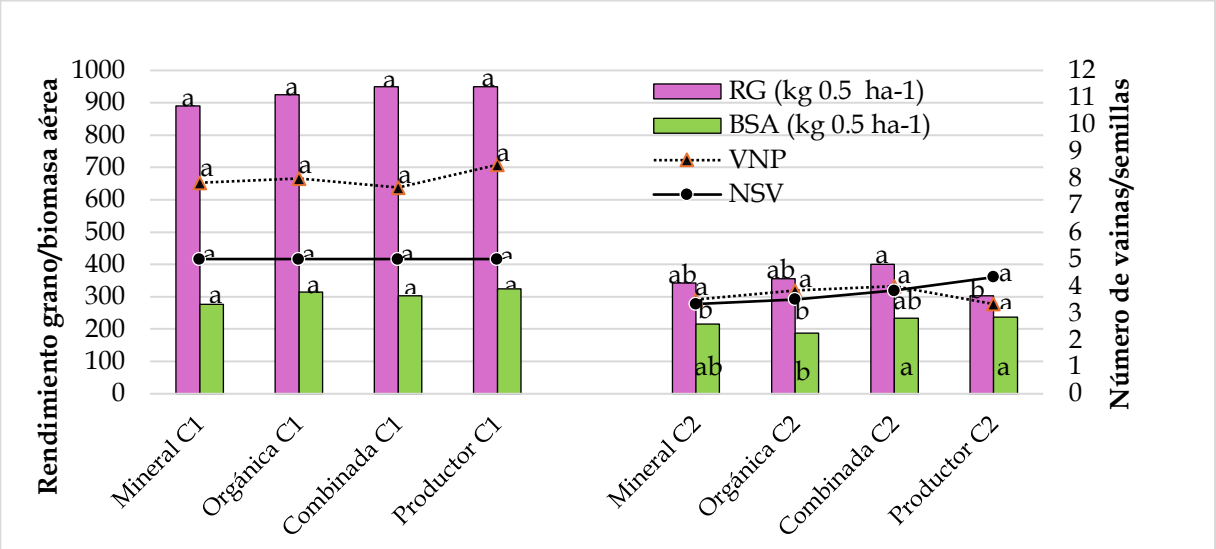


Figura 1. Respuesta del frijol pinto a diferentes fuentes de fertilización durante el ciclo otoño-invierno 2023-2024 (C1) y primavera-verano 2024 (C2).

Medias con las mismas letras en cada barra, no difieren estadísticamente (Tukey, P ≤ 0.05); RG: rendimiento de grano; BSA: biomasa seca aérea; VNP: vainas normales por planta; NSV: número de semillas por vaina.

Efecto de la fuente de fertilización en maíz. La fertilización en maíz pepitilla V-236P ciclo OI mostró significancia únicamente para el rendimiento de grano y peso de 100 granos (Figura 2). La fertilización combinada orgánica-mineral incrementó significativamente (P ≤ 0.05) el rendimiento de grano y peso de 100 granos en un 36% y 18% respectivamente, en comparación con la fertilización convencional del productor (1400 kg 0.5 ha^{-1}, 23 g), sin mostrar diferencias estadísticas con la fertilización mineral y orgánica. De igual forma, en numerosos estudios se ha reportado incremento del rendimiento de cultivos (Tapia y Sedillo, 2019; Jácome *et al*., 2013), como uno de los beneficios de la sinergia de la fertilización combinada; además de reducir las dosis de fertilizantes nitrogenados de fuentes sintéticas, incrementar la fertilidad del suelo, interacciones positivas en la disponibilidad de N y absorción de la planta (Gram *et al*., 2020).

En cuanto a las variables longitud de mazorca, granos por mazorca, índice de desgrane y biomasa seca aérea (valores promedios= 11 cm, 352, 0.85% y 2,930 kg 0.5 ha^{-1}, respectivamente) no presentaron diferencia estadística.

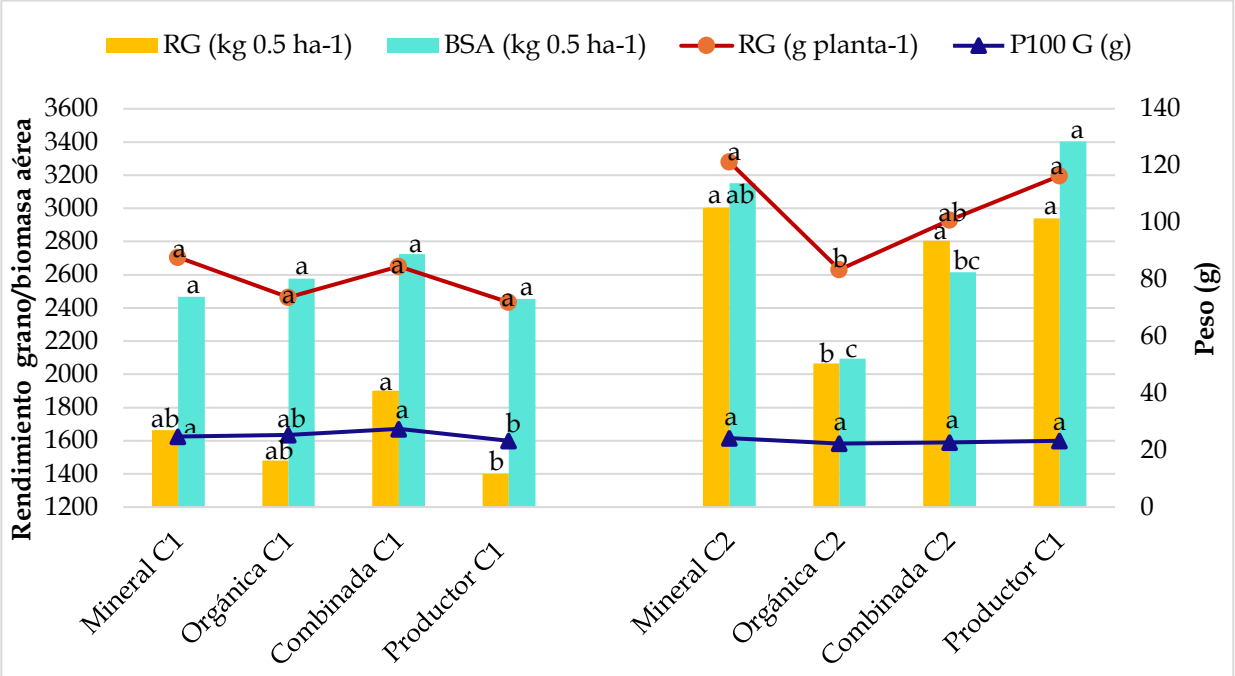


Figura 2. Rendimiento de maíz pepitilla V-236P OI 2023-2024 (C1) y maíz DK-357 en PV 2024 (C2) con diferente tratamiento de fertilización.

Medias con las mismas letras en cada barra, no difieren estadísticamente (Tukey, P ≤ 0.05); RG: rendimiento de grano; BSA: biomasa seca aérea; P100 G: peso de 100 granos.

Por otra parte, en maíz DK-357 ciclo PV las fuentes de fertilización fueron altamente significativas (P ≤ 0.05) en rendimiento y sus componentes, excepto el índice de desgrane y peso de 100 granos (Figura 2).

La fertilización mineral, convencional del productor y combinada orgánica-mineral incrementaron significativamente (P ≤ 0.05) el rendimiento de grano en un 42% más respecto a la fertilización orgánica (2065 kg 0.5 ha^{-1}). Así mismo, en un estudio de metanálisis sobre el papel a largo plazo de las enmiendas orgánicas, Chen *et al*. (2018) señala que la aplicación de enmiendas orgánicas fue significativa en el rendimiento de cultivos únicamente cuando se comparó con el testigo absoluto. Por lo anterior, el mayor beneficio de las enmiendas orgánicas es el de acondicionamiento del suelo más que de suministro de nutrientes (Jácome *et al*., 2013).

La biomasa seca aérea aumentó significativamente (P ≤ 0.05) con la fertilización convencional y mineral respecto a la orgánica; la fertilización combinada se comportó estadísticamente igual que la mineral. De manera similar, en un estudio de cultivo intercalado maíz-frijol y habas, Tapia y Sedillo (2019) reportaron mayor rendimiento de rastrojo de maíz con fertilización mineral y combinada orgánico-mineral. Al respecto, Brady y Weil (1999) señalan que la producción de biomasa depende del contenido de

nutrientes rápidamente disponibles en los fertilizantes minerales, contrario a los abonos orgánicos que se mineralizan lentamente.

El incremento del rendimiento de grano en plantas con fertilización combinada se asoció con mayor longitud de mazorca y granos por mazorca. Mientras que el índice de desgrane y el peso de 100 granos no se vieron afectados por las fuentes de fertilización, los cuales presentaron valores promedios de 0.85% y 23 g.

Independientemente de los materiales de maíz evaluados, la fertilización combinada orgánica-mineral y mineral completa logró mayor rendimiento de maíz y frijol o es equiparable a los rendimientos obtenidos con la fertilización convencional del productor. Ambas estrategias de fertilización representan una alternativa viable para mejorar la eficiencia de uso de fertilizantes en la región, en donde se suele usar altas dosis de fertilizantes nitrogenados y fosfatados.

Eficiencia relativa de la tierra en el cultivo intercalado maíz-frijol. En el presente estudio se reportan índices de eficiencia relativa de la tierra para el arreglo topológico de dos surcos de maíz intercalados con dos de frijol de mata (MMFF), tratados con fertilización combinada orgánico-mineral y evaluados en condiciones de riego y temporal. En condiciones de riego se obtuvo un valor de 1.59 y en condiciones de temporal de 1.20. Un valor mayor a 1 indica una ventaja del rendimiento obtenido en el sistema de cultivos intercalados respecto al monocultivo. En estudios previos del cultivo intercalado maíz-frijol se han obtenido valores de 1.29 en sistema MMFF y 1.27 en MFMF (Albino-Garduño *et al*., 2016); de 1.05 a 1.81 según arreglo topológico y método de labranza (Hernández-Escobar *et al*., 2024).

CONCLUSIONES

El sistema de cultivo maíz-frijol intercalados entre árboles jóvenes de aguacatero alcanzó una eficiencia relativa de uso de la tierra de 1.59 en el primer ciclo y 1.20 en el segundo, los valores indican mayor ventaja del rendimiento obtenido en sistema de cultivos intercalados respecto al monocultivo. Lo que resalta la viabilidad del sistema MIAF en la región experimental señalada.

El rendimiento de grano de maíz y frijol con fertilización orgánica-mineral fue similar al obtenido con fertilización mineral y convencional del productor, lo que constituye una alternativa viable para mejorar la eficiencia del uso de fertilizantes en el sistema de cultivo intercalado en la zona Me'phaa de Atlixtac, Guerrero.

BIBLIOGRAFÍA

Albino Garduño, R., Turrent Fernández, A., Cortés Flores, J. I., González Estrada, A., Mendoza Castillo, Ma.C., Volke Haller, V. H. & Santiago Mejía, H. (2016). Optimización económica de N, P, K y densidades de plantación en maíz y frijol intercalados. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(5), 993-1004.

Brady, N.C., & Weil, R.R. (1999). The nature and properties of soils. New Jersey, USA: Prentice Hall.

Chen, Y., Camps-Arbestain, M., Shen, Q. et al. (2018). The long-term role of organic amendments in building soil nutrient fertility: a meta-analysis and review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 111, 103-12. https://doi.org/10.1007/s10705-017-9903-5.

Hernández-Escobar, M. R., Cortés Flores, J. I., Turrent-Fernández, A. & Camas-Gómez, R. (2024). Maíz y Frijol en MIAF con Diferentes Labranzas y Arreglos Topológicos. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-16. e1388. https://doi.org/10.28940/terra. v42i0.1388.

Jácome V., A. R., Peñarete M., W. & Daza T., M. C. (2013). Fertilización orgánica e inorgánica en fríjol (*Phaseolus vulgaris* l.) en suelo inceptisol con propiedades ándicas. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (12), 59-67.

Mead, R. & Willey, W. R. (1980). The concept of a "Land Equivalent Ratio" and the advantages in yields from intercropping. *Experimental Agriculture*, 16(3), 217- 228.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP. (2023). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/.

Steel, R. G. D. & Torrie, J. H. (1986). Bioestadística: Principios y procedimientos. 2 ed., México: McGraw-Hill, 620 p.

Tapia, L. G. & Sedillo, I. R. (2019). Fertilización mineral y orgánica en el cultivo intercalado maíz-frijol asociados y haba en un Andosol del Estado de México. *Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, 7, 29-40. https://doi.org/10.5377/payds.v7i0.8412.

Zayas-Infante, S., Boeckx, P. & Vargas-Rodríguez, H. (2019). Comportamiento productivo en agroecosistemas de intercalamiento yuca-frijol en el municipio "Calixto García", provincia de Holguín. *Cultivos Tropicales*, 40(1).

APLICACIÓN FOLIAR DE NANOPARTÍCULAS DE SELENIO Y ZINC SOBRE BIOMASA E INTERCAMBIO GASEOSOS EN ESPINACA

Alan Álvarez Monge[1]; Esteban Sánchez Chávez[1]; Julio César Anchondo Páez[1]; Juan José Patiño Cruz[1]; Erick Humberto Ochoa Chaparro[1]; Cristina Larissa Franco Lagos[1]; Carlos Abel Ramírez Estrada[1]

[1] Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Av. 4ta. Sur 3820, Fracc. Vencedores del Desierto. Cd. Delicias, Chihuahua. México. C. P. 33089.

Correo del autor de correspondencia: esteban@ciad.mx.

RESUMEN

El zinc (Zn) es un micronutriente esencial, mientras que el selenio (Se) se clasifica como un elemento benéfico, ambos participan en procesos antioxidantes, enzimáticos así mismo en el crecimiento y desarrollo de las plantas. El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de la aplicación foliar con nanopartículas de selenio (NPsSe) con la combinación de distintas fuentes de Zn sobre el crecimiento y parámetros de intercambio gaseoso en espinaca. Se utilizaron semillas de espinacas cv F1 3030, se desarrollaron en un invernadero de malla sombra, utilizando macetas de 5 L llenas con sustrato compuesto de vermiculita y perlita (2:1). El riego se aplicó cada 48 h utilizando una solución nutritiva de Hoagland. Se empleó un diseño completamente al azar con 13 tratamientos de Se/Zn y un testigo, con seis repeticiones. Los tratamientos de NPsSe y Zn se aplicaron vía foliar cada siete días después del trasplante, a distintas dosis de Se 0, 25, 50, 100, 150 ppm, y de Zn dosis fija 100 ppm. Los resultados obtenidos indicaron que la aplicación foliar de nanopartículas de selenio a dosis bajas en combinación con nanopartículas de óxido de zinc mejora la acumulación de la biomasa aérea y radicular; por otro lado, la combinación de nanopartículas de selenio con sulfato de zinc a dosis altas (Se100 + ZnS) aumentó la biomasa y el intercambio gaseoso en las hojas de espinaca.

PALABRAS CLAVE: *Biofortificación; fotosíntesis; micronutrientes; nanotecnología; Spinacia oleracea* L.

INTRODUCCIÓN

El zinc (Zn) es un micronutriente esencial para el metabolismo vegetal, mientras que el selenio (Se) se considera un elemento benéfico. El Zn participa directamente en procesos fisiológicos clave como la fotosíntesis, el balance redox, la regulación estomática y la síntesis de proteínas. Por su parte, el Se, aunque no es esencial, puede estimular dichos procesos al mejorar la capacidad antioxidante y la tolerancia al estrés en las plantas. Aunque se requieren en concentraciones mínimas, su deficiencia en el cultivo puede limitar el crecimiento y desarrollo de las plantas, lo que afecta su rendimiento (Tang *et al*., 2020). Sin embargo, alrededor de la mitad de las superficies de cultivos a nivel mundial experimentan deficiencia de Zn en el suelo, mientras que aproximadamente el 20 % del suelo en todo el mundo es deficiente en Se (Zheng *et al*., 2024).

La disponibilidad y asimilación de Se y Zn en las plantas pueden verse influenciadas por factores como la composición del suelo, el pH, la forma química del nutriente y la vía de aplicación (Xue *et al*., 2023). La aplicación foliar es una herramienta agronómica estratégica, para aumentar el contenido de nutrientes en las plantas, en particular con el uso de nanopartículas, que por su tamaño (1-100 nm) favorecen la penetración y absorción en los tejidos vegetales (Ei *et al*., 2020). Sus propiedades garantizan la efectividad de los nutrientes para las plantas y una respuesta fisiológica más rápida, en comparación con la fertilización convencional. Estudios previos han demostrado que el uso de nanopartículas mejora la resistencia de las plantas a estrés abiótico y biótico. La aplicación de nanopartículas (NPs) de zinc y selenio, aumentó los rendimientos, el contenido de compuestos bioactivos y las capacidades antioxidantes en algunas plantas (Montaño-Herrera *et al*., 2022). Por lo que, el objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de la aplicación foliar con nanopartículas de selenio (NPsSe) y la combinación de distintas fuentes de Zn sobre el crecimiento y parámetros de intercambio gaseoso en espinaca (*Spinacia oleracea* L).

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en un invernadero con malla sombra en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD) en Delicias, Chihuahua, México durante los meses de mayo a julio de 2025. En el estudio, se utilizaron plantas de espinaca cv. F1 3030. Durante el experimento las plantas se irrigaron con una solución nutritiva estándar Hoagland con un pH de 6±0.1, la cual se aplicó cada 24 h. Los tratamientos se establecieron por nanopartículas de selenio (NPsSe) a distintas dosis: 0, 25, 50, 100, 150 ppm, combinadas con distintas fuentes de zinc a una dosis fija (100 ppm). Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, con 13 tratamientos: testigo, 4 de NPsSe + NPsZnO, 4 de NPsSe + GoZin17 y 4 de NPsSe + $ZnSO_4$, los cuales fueron aplicados vía foliar. Se tuvieron 6 repeticiones por tratamiento, con un total de 78 unidades experimentales.

Los parámetros fisiológicos evaluados fueron: Biomasa foliar y radicular (g planta $^{-1}$ de peso fresco (p.f.)), intercambio gaseoso (actividad fotosintética, conductividad estomática, tasa de transpiración y fluorescencia de la clorofila).

La medición de los parámetros de intercambio gaseoso se realizó con un analizador portátil LI-COR 6400, directamente en la planta. La concentración de CO_2 para la celda de referencia fue de 400 µmol/mol y para la celda de la muestra una concentración de 410 µmol/mol de CO_2. La actividad fotosintética se expresó como µmol de CO_2 m^2 s^{-1}, la conductancia estomática como mol de CO_2 m^2 s^{-1}, la tasa de transpiración en mmol H_2O m^{-2} s^{-1} y la eficiencia del fotosistema II en Fv'/Fm' (Palacio-Márquez et al., 2021).

Una vez obtenidos los datos, se sometieron a un análisis de varianza y una prueba de separación de medias mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ ($P \leq 0.05$) a través del software SAS versión 9.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La biomasa es uno de los parámetros esenciales para determinar la eficiencia de los nutrientes en los cultivos (Szarka *et al*., 2012). En el presente estudio, se observaron diferencias significativas en la biomasa aérea, por efecto de los diferentes tratamientos de NPs de Se combinado con diferentes fuentes de Zn, aplicados de manera foliar, sobresaliendo con mayor biomasa aérea las fuentes Se25 + ZnO, Se25 + ZnS, Se50 + ZnS y Se100 + ZnS, en relación con el control (sin aplicación) con menor biomasa aérea (Figura 1).

Con respecto a la biomasa radicular (Figura 2), el mejor tratamiento fue NPs Se25 + NPs ZnO en comparación con el control. Estos resultados indicaron que la fuente NPs Se25 + NPs ZnO combinados mejoraron tanto la biomasa radicular como aérea, por lo cual es una opción interesante para el desarrollo y el crecimiento del cultivo de espinaca. Resultados similares han demostrado efectos positivos en la acumulación de biomasa en arroz, trigo y albahaca. (Kong *et al*., 2024; Szerement *et al*., 2022).

La fotosíntesis es el proceso fisiológico mediante el cual las plantas capturan la energía lumínica del sol y el CO_2 atmosférico para convertirla en energía química, lo que favorece el crecimiento y desarrollo de la planta (Kanwar *et al*., 2019). En el presente estudio, en cuanto a la actividad fotosintética (Figura 3a), los tratamientos mostraron diferencias significativas. Las combinaciones que incluyeron Se/ZnS como fuente de zinc mostraron los valores más altos, destacando el tratamiento Se100 + ZnS, que presentó la mayor tasa fotosintética con 24.16 µmol Co_2 m^{-2} s^{-1}, en comparación con el control, con una tasa de 15.55 µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}.

Respecto a la conductancia estomática (Figura 3b), los tratamientos Se25 + ZnO y Se100 +ZnS evidenciaron una mayor apertura estomática, con valores cercanos a 0.10 mol H_2O m^{-2} s^{-1}, superando al control, que presentó una conductancia de alrededor de 0.08 mol H_2O m^{-2} s^{-1}. Esto sugiere una mejora en el intercambio gaseoso aplicando el uso de nanopartículas.

En cuanto a la tasa de transpiración (Figura 3c), los tratamientos con Se/ZnS mostraron valores superiores, Se100 + ZnS alcanzó casi 4.8 mmol H_2O m^{-2} s^{-1}, en comparación con el control, que tuvo una tasa de 3.8 mmol H_2O m^{-2} s^{-1}. Esto indica una mayor eficiencia en el transporte de nutrientes y agua dentro de la planta.

Por otro lado, la fluorescencia de la clorofila (Fv/Fm) (Figura 3d), un indicador de la eficiencia fotosintética, los tratamientos Se25 + ZnO, Se50 + ZnO y Se100 + ZnS mostraron los valores más altos. El tratamiento Se25 + ZnO alcanzó una fluorescencia de 0.67, mientras que el control presentó un valor de alrededor de 0.62, lo que sugiere una mejora en la eficiencia del fotosistema II bajo el uso de nanopartículas a dosis bajas.

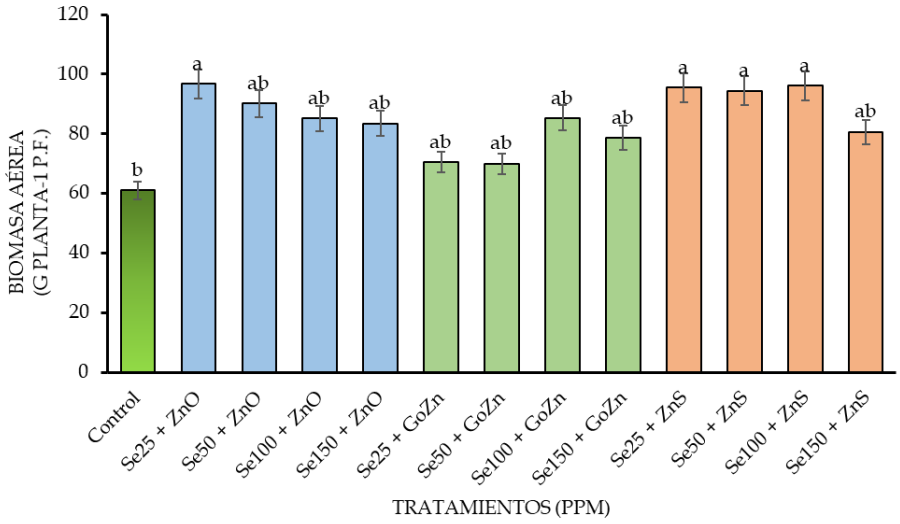


Figura 1. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de selenio aplicadas en diferentes dosis, combinado con distintas fuentes de zinc (nanopartículas de óxido de zinc (ZnO), GoZinc17 (GoZn) y sulfato de zinc (ZnS)) con una dosis fija (100 ppm), sobre biomasa foliar en espinaca.

Columnas con distinta letra indican diferencias estadísticas significativas (P ≤ 0.05) según la prueba de Tukey.

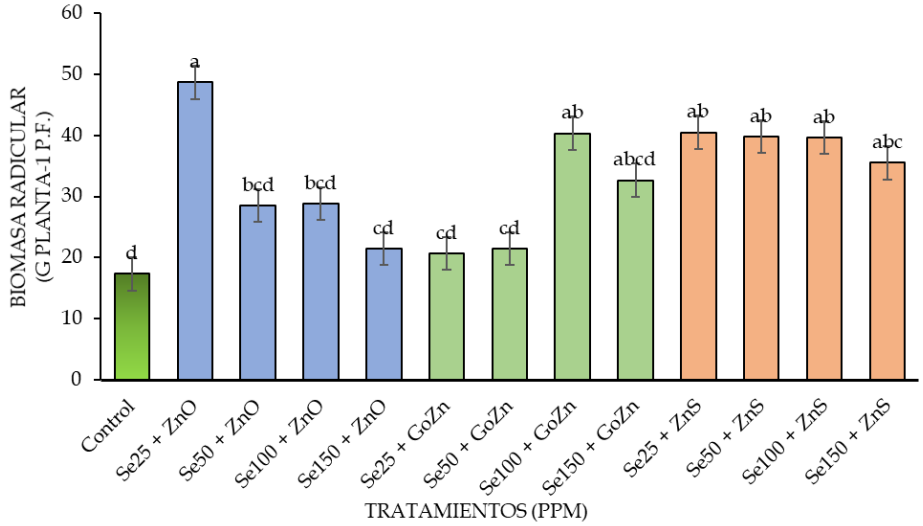


Figura 2. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de selenio aplicadas en diferentes dosis, combinado con distintas fuentes de zinc (nanopartículas de óxido de zinc (ZnO), GoZinc17 (GoZn) y sulfato de zinc (ZnS)) con una dosis fija (100 ppm), sobre biomasa radicular en espinaca.

Columnas con distinta letra indican diferencias estadísticas significativas (P ≤ 0.05) según la prueba de Tukey.

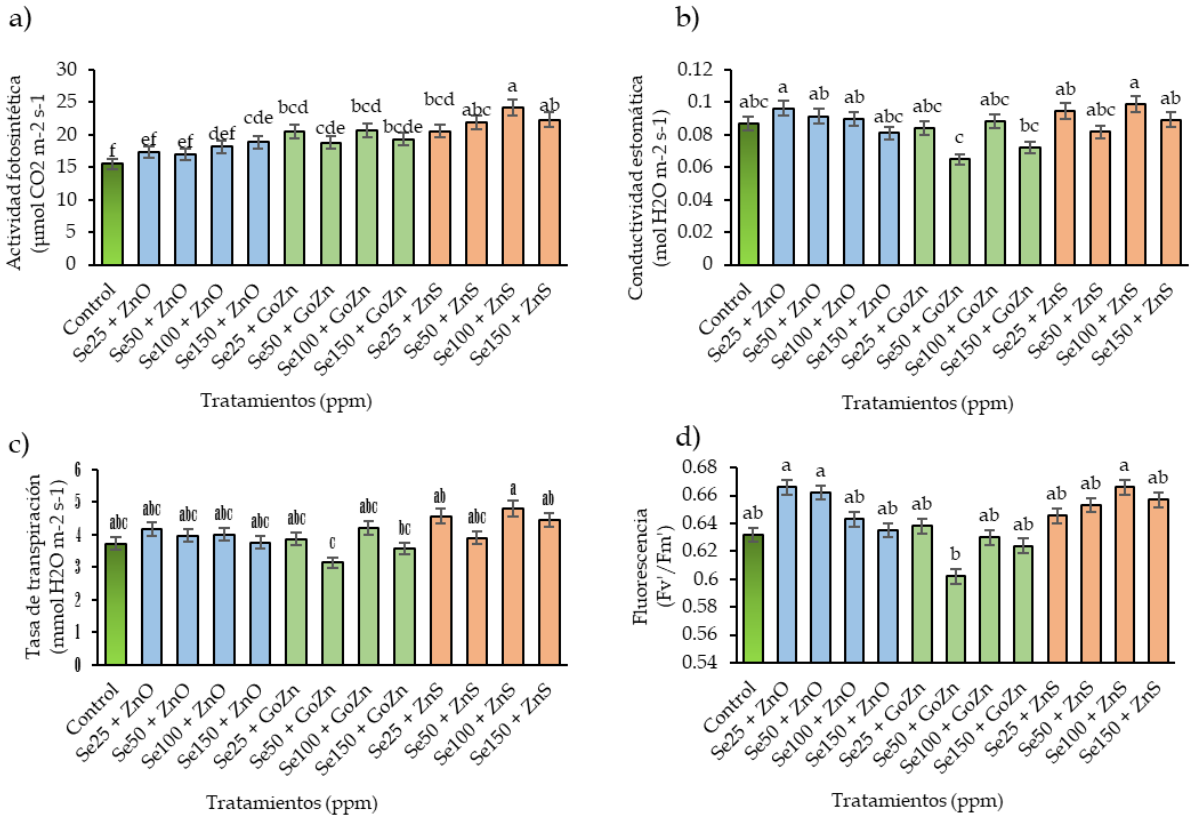


Figura 3. Efecto de la aplicación foliar de nanopartículas de selenio aplicadas en diferentes dosis, combinado con distintas fuentes de zinc (nanopartículas de óxido de zinc (ZnO), GoZinc17 (GoZn) y sulfato de zinc (ZnS)) con una dosis fija (100 ppm), sobre los parámetros de intercambio gaseosos (Actividad fotosintética (a), Conductividad estomática (b), Tasa de transpiración (c) y Fluorescencia (d).

Columnas con distinta letra indican diferencias estadísticas significativas (P ≤ 0.05) según la prueba de Tukey.

CONCLUSIONES

La aplicación foliar de nanopartículas de selenio (NPsSe) en combinación con nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) a dosis bajas (Se25 + ZnO) mejoró la acumulación de biomasa aérea y radicular en espinaca, sin embargo, la combinación de NPsSe combinadas con sulfato de zinc (ZnS) a dosis altas (Se100 + ZnS), aumento el crecimiento de biomasa aérea y radicular, así como, los parámetros de intercambio gaseoso, incluyendo la actividad fotosintética, la conductancia estomática y la tasa de transpiración, lo que demuestra una sinergia entre las NPsSe y el sulfato de zinc, teniendo una mayor eficiencia fisiológica en la planta. La fluorescencia de la clorofila, como indicador de la eficiencia del fotosistema II, aumentó con los tratamientos de NPsSe + NPsZnO y NPsSe + ZnS, lo que demostró que la aplicación foliar de las nanopartículas incrementó la eficiencia fotosintética en plantas de espinaca.

BIBLIOGRAFÍA

Ei, H. H., Zheng, T., Farooq, M. U., Zeng, R., Su, Y., Zhang, Y., ... & Zhu, J. (2020). Impact of selenium, zinc and their interaction on key enzymes, grain yield, selenium, zinc concentrations, and seedling vigor of biofortified rice. *Environmental Science and Pollution Research,* 27(14), 16940-16949. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08202-8.

Kanwar, M.K., Sun, S., Chu, X., Zhou, J., (2019). Impacts of Metal and Metal Oxide Nanoparticles on Plant Growth and Productivity. In: Nanomaterials and Plant Potential. Husen, A., Iqbal, M., (Eds). Springer, Cham. pp. 379-392. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05569-1_15.

Kong, L., Tao, Y., Xu, Y., Zhou, X., Fu, G., Zhao, L., ... & Wan, Y. (2024). Simultaneous biofortification: Interaction between zinc and selenium regarding their accumulation in wheat. *Agronomy*, 14(7), 1513. https://doi.org/10.3390/agronomy14071513.

Montaño-Herrera, A., Santiago-Saenz, Y. O., López-Palestina, C. U., Cadenas-Pliego, G., Pinedo-Guerrero, Z. H., Hernández-Fuentes, A. D., & Pinedo-Espinoza, J. M. (2022). Effects of Edaphic Fertilization and Foliar Application of Se and Zn Nanoparticles on Yield and Bioactive Compounds in Malus domestica L. *Horticulturae*, *8*(6), 542. https://doi.org/10.3390/horticulturae8060542.

Palacio-Márquez, A., Ramírez-Estrada, C. A., Gutiérrez-Ruelas, N. J., Sánchez, E., Ojeda-Barrios, D. L., Chávez-Mendoza, C., & Sida-Arreola, J. P. (2021). Efficiency of foliar application of zinc oxide nanoparticles versus zinc nitrate complexed with chitosan on nitrogen assimilation, photosynthetic activity, and production of green beans (*Phaseolus vulgaris L.*). *Scientia Horticulturae*, *288*, 110297. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110297.

Szarka, A., Tomasskovics, B., & Bánhegyi, G. (2012). The ascorbate-glutathione-α-tocopherol triad in abiotic stress response. *International Journal of Molecular Sciences,* 13(4), 4458-4483. https://doi.org/10.3390/ijms13044458.

Szerement, J., Szatanik-Kloc, A., Mokrzycki, J. y Mierzwa-Hersztek, M. (2022). Biofortificación agronómica con Se, Zn y Fe: una estrategia eficaz para mejorar la calidad nutricional de los cultivos y la defensa contra el estrés: una revisión. *Revista de Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, *22*(1), 1129-1159. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00719-2.

Tang, L., Hamid, Y., Liu, D., Shohag, M. J. I., Zehra, A., He, Z., ... and Yang, X. (2020). Foliar application of zinc and selenium alleviates cadmium and lead toxicity of water spinach: a bioavailability/cytotoxicity study using human cell lines. *Environment International,* 145, 106122. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106122.

Xue, Y. F., Li, X. J., Yan, W., Miao, Q., Zhang, C. Y., Huang, M., ... and Cui, Z. L. (2023). Biofortification of different maize cultivars with zinc, iron, and selenium by foliar fertilizer applications. *Frontiers of Plant Science,* 14, 1144514. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1144514.

Zheng, S., Xu, C., Zhu, H., Huang, D., Wang, H., Zhang, Q., ... & Zhu, Q. (2024). Foliar application of zinc and selenium regulates cell wall fixation, physiological and gene expression to reduce cadmium accumulation in rice grains. *Journal of Hazardous Materials,* 480, 136302. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136302.

EFICIENCIA FOTOSINTÉTICA Y RENDIMIENTO EN PLANTAS DE FRIJOL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MELATONINA

Carlos Abel Ramírez Estrada[1]; Esteban Sánchez Chávez[1]; Juan José Patiño Cruz[1], Erick Humberto Ochoa Chaparro[1]; Julio César Anchondo Páez[1], Alan Álvarez Monge[1], Cristina Larissa Franco Lagos[1]

[1] Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Av. 4ta. Sur 3820, Fracc. Vencedores del Desierto. Cd. Delicias, Chihuahua. México. C. P. 33089.

Correo del autor de correspondencia: esteban@ciad.mx

RESUMEN

La fotosíntesis juega un papel esencial en la productividad de los cultivos hortícolas, donde el uso de bioestimulantes como la melatonina modula una serie de procesos internos de la planta. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación foliar de melatonina en la acumulación de biomasa, rendimiento, tasa fotosintética, conductancia estomática, transpiración y concentración de sacarosa en plantas de frijol cv. Strike cultivado en macetas con vermiculita y perlita (2:1). Los tratamientos consistieron en la aspersión foliar de 1, 10 y 100 µM de melatonina, incluyendo un testigo sin aplicación. La aplicación de los tratamientos se realizó cada 7 días, en 5 ocasiones a partir de la segunda semana, a la emergencia de las plántulas. Se evaluó el intercambio gaseoso, tasa (transpiración y fotosintética), biomasa, rendimiento y concentración de sacarosa. La aplicación de 100 µM de melatonina incrementó la biomasa y rendimiento de las plantas de frijol. Las dosis entre 10 y 100 µM demostraron mejorar los parámetros de intercambio gaseoso fotosintético y la acumulación de sacarosa respecto al control. Además, la dosis de 100 µM fue la más eficiente en la promoción del crecimiento y rendimiento, al modular la biosíntesis de sacarosa. Estos productos podrían ser utilizados para la síntesis de agroinsumos en forma de bioestimulantes.

PALABRAS CLAVE: *Bioestimulante; bioasa; conductancia estomática; Phaseolus vulgaris* L.

INTRODUCCIÓN

La fotosíntesis es un proceso clave en la acumulación de biomasa y determina el rendimiento de los cultivos en alrededor del 90% (Yamori, 2020). Este proceso incluye la difusión del dióxido de carbono (CO_2) por los estomas con su posterior carboxilación en los cloroplastos. Asimismo, entre los productos generados se incluye la sacarosa, principal azúcar de transporte en las plantas (Xu *et al.,* 2015). Por lo tanto, alteraciones en la fotosíntesis pueden reducir la productividad de los cultivos (Wu *et al.,* 2019).

La aplicación de bioestimulantes, particularmente la melatonina, se ha posicionado como una estrategia sostenible para modular procesos fisiológicos en plantas, al promover un incremento significativo de su productividad (Calvo *et al.,* 2014). Estudios previos han demostrado el efecto de la melatonina en la capacidad fotosintética distintas especies, incluyendo el frijol común (*Phaseolus vulgaris*) (Kuppusamy *et al.,* 2023). Al

respecto, su aplicación en esta leguminosa mejoró el crecimiento vegetativo, tasa fotosintética, conductancia estomática y concentración de clorofila (Azizi *et al.,* 2022). En especies similares como la soya en condiciones de estrés hídrico, la aspersión de melatonina minimizó los efectos negativos de esta condición, mediante la mejora del intercambio gaseoso, eficiencia fotosintética y la acumulación de biomasa (Zhang *et al.,* 2019). Resultados similares son reportados en plantas de lenteja por Yasmeen *et al.* (2022). Sin embargo, en la planta de frijol persisten áreas poco exploradas del conocimiento relacionadas con los mecanismos fotosintéticos (fotosistemas, transporte de electrones, fijación de CO_2, entre otros) regulados por la melatonina. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar la respuesta de la aplicación foliar de melatonina en la acumulación de biomasa, rendimiento, tasa fotosintética, conductancia estomática, transpiración, concentración de clorofila y concentración de sacarosa en plantas de frijol ejotero cv Strike.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en el Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, Delicias, Chihuahua, México, durante los meses de septiembre y octubre de 2022, en condiciones de malla sombra. Se utilizaron semillas de frijol ejotero cv. Strike proporcionadas Hydro Enviroment®, empresa dedicada a la comercialización de semillas y agroinsumos. El suministro de nutrientes fue realizado con una solución nutritiva estándar Hoagland. El experimento fue establecido en un diseño completamente al azar con 6 repeticiones. Se evaluaron 4 dosis de melatonina 0, 1, 10 y 100 µM.

Se evaluó la acumulación de biomasa total y se expresó como g planta^{-1}. Adicionalmente, se evaluó el rendimiento como g planta^{-1} de peso fresco (pf). Además, la tasa fotosintética, conductancia estomática y transpiración fueron determinados por el método descrito por Ramírez *et al.* (2023). Finalmente, la concentración de sacarosa se cuantificó por el método de García-Caparros *et al.* (2021). Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza y una prueba de separación de medias mediante la prueba de LSD-Fisher con un nivel de significancia de α=0.05 ($P \leq 0.05$) a través del software SAS versión 9.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aspersión de melatonina mejoró la acumulación de biomasa, pero la dosis de 100 µM alcanzó un valor que superó en 70% al control. Estos resultados coinciden con r (Ren *et al.*, 2021) quienes reportan en plántulas de maíz un incremento del 71% de biomasa con la aplicación de melatonina en dosis similares. Por otro lado, los datos obtenidos para rendimiento en el presente trabajo de investigación presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos, al incrementar de forma significativa el peso en fresco de vainas con respecto al control (Figura 1). Al respecto, aplicaciones foliares de 25 y 50 µM incrementaron los valores de rendimiento en frijol en 39 y 45%, respectivamente (Sadak *et al.*, 2020).

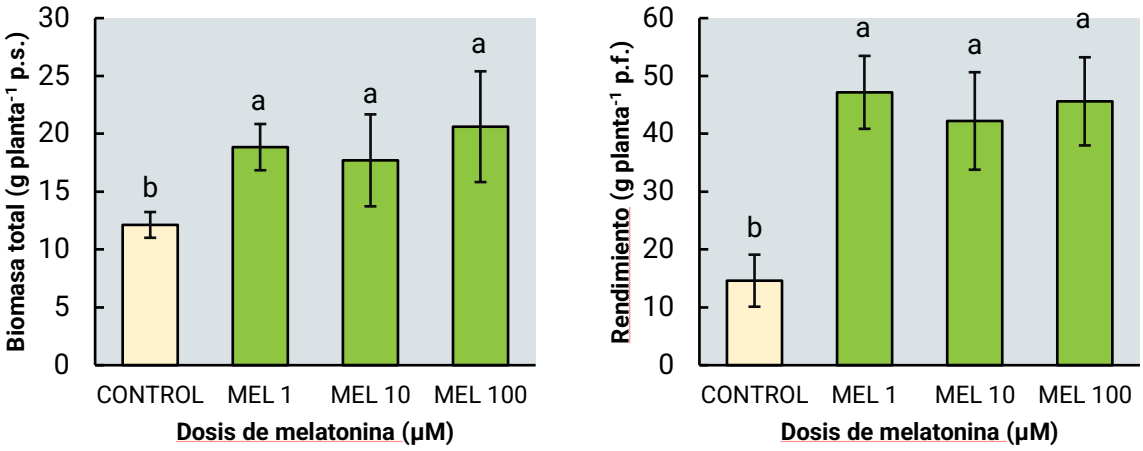


Figura 1. Efecto de la aplicación foliar de melatonina sobre la acumulación de biomasa (izquierda) y rendimiento (derecha) en plantas de frijol ejotero.

El tratamiento con 10 µM de melatonina incrementó de forma significativa los datos de conductancia estomática (86%), tasa de transpiración y fotosíntesis, estos últimos en una proporción de 6 y 4.6 veces con respecto al control (Cuadro 1). En este sentido, Ahmad *et al. (*2022) al asperjar 100 µM de melatonina en maíz reportan un incremento del 14.3% en la tasa fotosintética, lo que sugiere una modulación en la expresión genética en las subunidades enzimáticas de la ribulosa bifosfato carboxilasa, una enzima clave en la fijación de CO_2 durante el ciclo de Calvin.

Cuadro 1. Efecto de la aplicación foliar de melatonina (MEL) en dosis de 0, 1, 10 y 100 µM sobre la conductancia estomática (mM CO^2 m^2 s^{-1}) y la tasa de transpiración (mM H_2O m^2 s^{-1}) en plantas de frijol.

	Conductancia estomática (mM of CO_2 m^2 s^{-1})	**Tasa de transpiración (mM of H_2O m^2 s^{-1})**
Control	0.0066±0.001 d	0.2565±0.049 c
MEL 1µM	0.0197±0.006 c	0.7035±0.183 b
MEL 10µM	0.0425±0.012 a	1.4777±0.368 a
MEL 100µM	0.0312±0.011 b	1.0788±0.355 ab

Los medios con letras iguales no difieren según la prueba LSD-Fisher ($p \leq 0,05$).

La concentración de sacarosa presentó los valores más altos en las plantas asperjadas con 100 µM de melatonina (figura 2). En plantas de soya, Cao *et al*. (2021) con la aplicación foliar de 100 µM observaron un incremento de 16% en la concentración de sacarosa, un monosacárido esencial para el desarrollo de los órganos-sumidero, incluyendo vainas, flores y hojas.

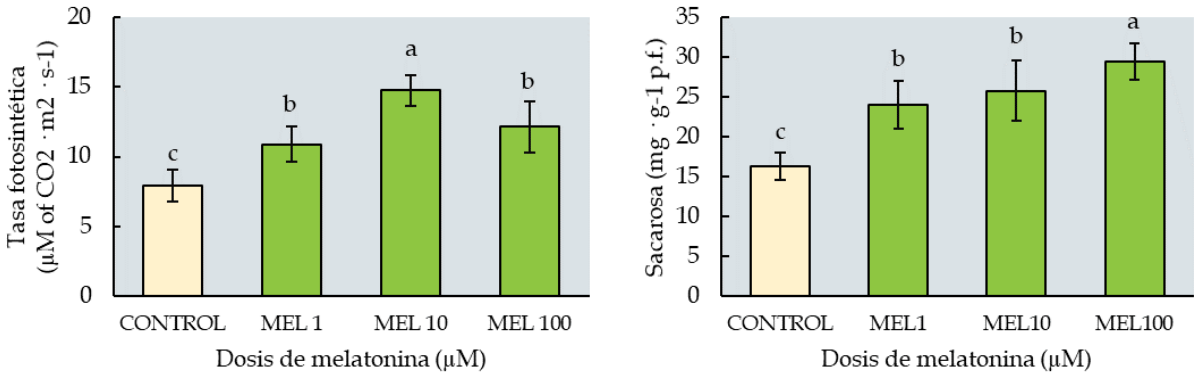


Figura 2. Efecto de la aplicación foliar de melatonina sobre la Tasa fotosintética (izquierda) y concentración de sacarosa (derecha) en plantas de frijol ejotero.

CONCLUSIONES

La aplicación foliar de melatonina incrementó la biomasa y mejoró el intercambio de gases fotosintético. La mejor eficiencia fotosintética se obtuvo con la aplicación en dosis bajas; en dosis intermedias o altas, la aplicación podría aumentar la duración de la etapa de crecimiento vegetativo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo brindado a través del programa de Becas Nacionales, con el número de CVU 1011744.

BIBLIOGRAFÍA

Ahmad, S., Kamran, M., Ding, R., Meng, X., Wang, H., Ahmad, I., ... & Han, Q. (2019). Exogenous melatonin confers drought stress by promoting plant growth, photosynthetic capacity and antioxidant defense system of maize seedlings. *PeerJ*, 7, e7793.

Azizi, F., Amiri, H. & Ismaili, A. (2022). Melatonin improves salinity stress tolerance of Phaseolus vulgaris L. cv. Pak by changing antioxidant enzymes and photosynthetic parameters. *Acta Physiologiae Plantarum*, 44(4), 40.

Calvo, P., Nelson, L. & Kloepper, J.W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant and soil*, 383, 3-41.

Cao, L., Qin, B. & Zhang, Y.X. (2021). Exogenous application of melatonin may contribute to enhancement of soybean drought tolerance via its effects on glucose metabolism. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 35(1), 964-976.

Garcia-Caparros, P., Lao, M.T., Preciado-Rangel, P. & Sanchez, E. (2021). Phosphorus and carbohydrate metabolism in green bean plants subjected to increasing phosphorus concentration in the nutrient solution. *Agronomy*, 11(2), 245.

Kuppusamy, A., Alagarswamy, S., Karuppusami, K.M., Maduraimuthu, D., Natesan, S., Ramalingam, K., ... & Kanagarajan, S. (2023). Melatonin enhances the photosynthesis and antioxidant enzyme activities of mung bean under drought and high-temperature stress conditions. *Plants*, 12(13), 2535.

Ramírez-Estrada, C.A., Sánchez, E., Flores-Córdova, M.A., Pérez-Álvarez, S., Noperi-Mosqueda, L.C. & Chávez-Mendoza, C. (2023). Photosynthetic efficiency in green bean plants through the application of omeprazole and melatonin at low doses. *International Journal of Plant Biology*, 14(4), 864-878.

Ren, J., Yang, X., Ma, C., Wang, Y. & Zhao, J. (2021). Melatonin enhances drought stress tolerance in maize through coordinated regulation of carbon and nitrogen assimilation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 167, 958-969.

Sadak, M.S., Abdalla, A.M., Abd Elhamid, E.M. & Ezzo, M.I. (2020). Role of melatonin in improving growth, yield quantity and quality of Moringa oleifera L. plant under drought stress. *Bulletin of the National Research Centre*, 44(1), 18.

Wu, A., Hammer, G.L., Doherty, A., von Caemmerer, S. & Farquhar, G.D. (2019). Quantifying impacts of enhancing photosynthesis on crop yield. *Nature plants*, 5(4), 380-388.

Xu, Z., Jiang, Y. & Zhou, G. (2015). Response and adaptation of photosynthesis, respiration, and antioxidant systems to elevated CO2 with environmental stress in plants. *Frontiers in plant science*, 6, 701.

Yamori, W. (2020). Photosynthesis and respiration. In Plant factory (pp. 197-206). Academic Press.

Yasmeen, S., Wahab, A., Saleem, M.H., Ali, B., Qureshi, K.A. & Jaremko, M. (2022). Melatonin as a foliar application and adaptation in lentil (Lens culinaris Medik.) crops under drought stress. *Sustainability*, 14(24), 16345.

Zhang, M., He, S., Zhan, Y., Qin, B., Jin, X., Wang, M., ... & Wu, Y. (2019). Exogenous melatonin reduces the inhibitory effect of osmotic stress on photosynthesis in soybean. *PloS on*e, 14(12), e0226542.

BIOFORTIFICACIÓN CON NANOPARTÍCULAS DE YODO SOBRE LA BIOMASA Y CALIDAD MINERAL EN LECHUGA

Juan José Patiño Cruz[1]; Esteban Sánchez Chávez[1]; Erick Humberto Ochoa Chaparro[1]; Alan Álvarez Monge[1]; Carlos Abel Ramírez Estrada[1]; Julio Cesar Anchondo Páez[1]; Cristina Larissa Franco Lagos[1]

[1] Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Av. 4ta. Sur 3820, Fracc. Vencedores del Desierto. Cd. Delicias, Chihuahua. México. C. P. 33089.

Correo del autor de correspondencia: esteban@ciad.mx

RESUMEN

En todo el mundo, la carencia de yodo (I) afecta al 68% de la población, causando trastornos y enfermedades humanas. La concentración de yodo (I) en los vegetales es relativamente baja, pero puede mejorarse mediante biofortificación agronómica. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de nanopartículas de yodo (NPsI) *versus* yoduro de potasio (KI^-) sobre la biomasa y la calidad mineral a diferentes dosis en lechuga (*Lactuca sativa* L. var. Butterhead). Las variables evaluadas fueron la biomasa, el patrón de distribución y el grado de biofortificación en lechuga. El experimento se llevó a cabo en condiciones de invernadero con malla sombra en Delicias, Chihuahua, durante el periodo marzo-mayo de 2024. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con 6 tratamientos y un control sin aplicación, con 4 repeticiones, respectivamente. Los tratamientos consistieron en KI^- y NPsI a dosis de 0, 40, 80 y 160 µM los cuales se aplicaron de forma foliar semanalmente, con un total de cuatro aplicaciones. Los resultados obtenidos indican que la aplicación foliar de NPsI a dosis de 40 µM mejoró la acumulación de biomasa y grado de biofortificación en las plantas lechuga *cv* Butterhead, probablemente debido a las propiedades de la NPsI, tales como mayor superficie de contacto, mayor absorción y penetración del tejido, el tamaño de partícula y reactividad en comparación con KI^-. Finalmente, se concluye que el uso de nanopartículas de yodo fue más eficiente ya que permitió igualar los efectos de los fertilizantes convencionales (yoduro potásico) con una disminución del 50% en las dosis aplicadas. Esto las hace viables para incorporarlas a los programas de biofortificación con yodo de los vegetales.

PALABRAS CLAVE: *Lactuca sativa* L.; *biofortificación, lechuga, yodo, nanopartículas, nanotecnología.*

INTRODUCCIÓN

Se estima que a nivel mundial más del 50% de la población tiene problemas de desnutrición de macro y micronutrientes. La deficiencia de yodo afecta a (68%) de personas en el mundo. (Passarelli *et al*., 2024). El yodo es un oligoelemento terrestre que los mamíferos incorporan en la forma química de yoduro (I^-) indicar la fórmula química del yoduro) (Zbigniew, 2017). Además, de su importante actividad como eliminador de

especies reactivas de oxígeno (ROS), el yodo es un micronutriente beneficioso para las plantas y se ha clasificado como bioestimulante inorgánico e induce respuesta en el metabolismo (Consentino *et al*., 2023). La forma química I^- se considera antioxidante al servir de cofactor a la peroxidasa (Espino-Vázquez *et al*., 2022). A concentraciones micromolares (µM) el yodo favorece la acumulación de biomasa y floración temprana. Además, tiende a formar proteínas yodadas en brotes y raíces, las primeras asociadas en los cloroplastos por lo que está implicada en procesos fotosintéticos y las segundas se relacionan con la actividad de ciertas peroxidasas (Kifferle *et al*., 2021). En la actualidad, la mayoria de las vitaminas y minerales escenciales provienen de alimentos de origen vegetal. Una de las estrategias sencillas para mejorar el valor nutricional de la dmayoríamana es la biofortificación de esenciales (Jaiswal *et al*., 2022). Diversos estudios sobre biofortificación con yodo han tenido un efecto positivo en la acumulación de este nutriente en numerosos cultivos, específicamente en hortalizas, dentro de las cuales se han catalogado como cultivos clave las hortalizas de hoja, como lechuga (Duborská *et al*. 2020).

Respecto al uso de nanopartículas de yodo, es escasa la información, por lo que el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de nanopartículas de yodo (NPsI) *versus* yoduro de potasio (KI^-) sobre la biomasa y la calidad mineral a diferentes dosis en lechuga *cv* Butterhead.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en un invernadero con malla sombra en las instalaciones del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, en Delicias, Chihuahua, México, durante los meses de abril a mayo de 2024, bajo condiciones de malla sombra. Se utilizaron semillas de lechuga cv. butterhead adquiridas a la empresa Isla´s Garden Seed Company®. Las semillas se germinaron en charolas de unicel en condiciones de temperatura y humedad relativa ambientales. Posteriormente, las plántulas de lechuga se trasplantaron a macetas de 5 L, llenas completamente con una mezcla de vermiculita y perlita, en una proporción 2:1. Durante el experimento, las plantas se irrigaron con la solución nutritiva estándar Hoagland (pH 6.0-6.1). Se utilizó un diseño completamente al azar DCA. El factor por evaluar fue la aplicación de yoduro de potasio (KI^-) y nanopartículas de yodo (NPsI) vía foliar y los niveles fueron las dosis 0, 40, 80 y 160 µM con 7 tratamientos y 4 repeticiones.

Se cuantificó la biomasa que se expresó como g $planta^{-1}$ de peso seco (p.s.) Asimismo, se evaluó la concentración foliar de yodo que se expresó como µg g^{-1} de p.s. También, se realizó el patrón de distribución que se expresó en porcentaje. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza y una prueba de separación de medias mediante la prueba de LSD-Fisher con un nivel de significancia de $\alpha=0.05$ ($P \leq 0.05$) a través del software SAS versión 9.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El aumento en la biomasa es uno de los parámetros esenciales para determinar la eficiencia de los nutrientes en los cultivos (Szarka *et al*., 2012). En el presente estudio, la

aplicación foliar semanal de los tratamientos KI- y NPsI tuvo un efecto significativo ($p < 0.05$) en la biomasa. Se observó la mayor acumulación de biomasa con los tratamientos NPsI 40 y 160 µM, seguidos de KI- 40 µM, los cuales tuvieron un incremento del 81%, 68% y 45%, respectivamente, en relación con el control sin aplicación (Figura 1 A). Estos resultados son mayores comparados con lo reportado por Blasco, (2010). Para el estudio las dosis por encima de 40 µM tanto para KI- como Nano 40 pudieran considerarse elevadas o tóxicas para la planta, ya que a partir de estas dosis la acumulación de biomasa total disminuye.

La forma efectiva de conocer la biofortificación de un cultivo es a través del concepto "grado de biofortificación" el cual nos indica que tanto incrementó el contenido de un nutriente en las partes comestibles de una planta en relación con un control de referencia al cual no se le aplicó ningún tratamiento (Buturi *et al*., 2021). En el presente estudio, se observa que el mejor efecto de biofortificación se logró con los tratamientos de NPsI, resaltando las dosis de 40 µM con un incremento del 63% con diferencias estadística significativa ($p \leq 0.05$) respecto al control, seguido de NPsI a 160 µM y KI a 40 µM con incrementos del 47% y 41%, respectivamente y diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en comparación con el control (Figura 1 B).

Los presentes resultados concuerdan con lo reportado por Smoleń *et al*. (2016), Rui Li *et al*. (2017) y Tallarita *et al*. (2025) en cultivos de lechuga, pimiento y rúgula respectivamente. Se logró biofortificar exitosamente y cubrir la ingesta diaria recomendada (IDR) promedio de 150 µg día^{-1}. Es importante mencionar que lo reportado por los autores es específico para los comparativos con yoduro de potasio (KI-) debido a que no existen estudios sobre NPsI.

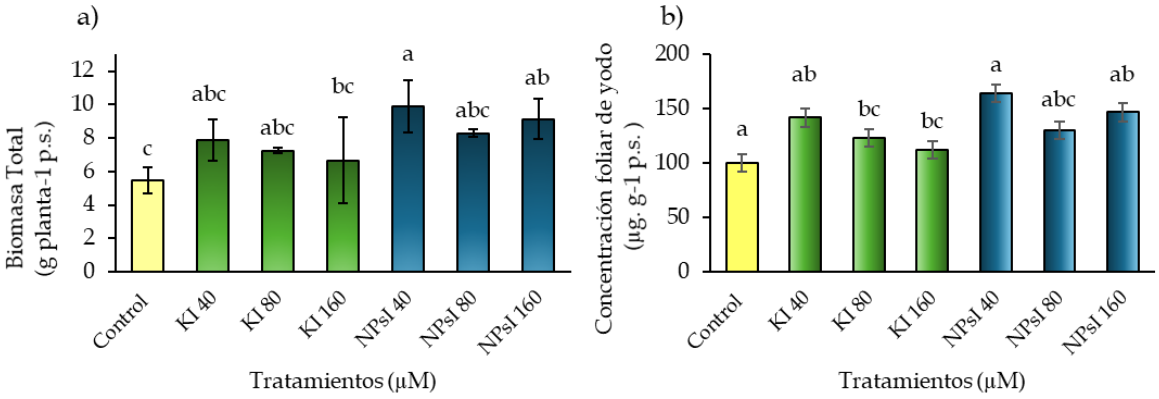


Figura 1. Efecto de la aplicación foliar de yoduro de potasio (KI-) y nanopartículas de yodo (NPsI) sobre la biomasa (A) y contenido foliar de yodo (B) en lechuga variedad butterhead.

Las letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos según la prueba LSD Fisher ($p \leq 0.05$). KI 40 = 40 µM de KI. KI 80 = 80 µM de KI. KI 160 = 160 µM de KI. NPsI 40 = 40 µM de NPsI. NPsI 80 = 80 µM de NPsI. NPsI 160 = 160 µM de NPsI.

El patrón de distribución es un indicador empleado para determinar la distribución de los nutrientes en los diferentes órganos de una planta (Yamaji y Ma, 2014). En el presente

estudio, el patrón de distribución del yodo en las plantas de lechuga presentó la siguiente distribución (Figura 2) y se usaron las siguientes fórmulas las cuales son expresadas en porcentaje.

$$\text{Hoja} = \frac{\Sigma\text{KIH} * 100}{\Sigma\text{TKI}};\ \text{Tallo} = \frac{\Sigma\text{KIT} * 100}{\Sigma\text{TKI}};\ \text{Raiz} = \frac{\Sigma\text{KIR} * 100}{\Sigma\text{TKI}}$$

$$\text{Hoja} = \frac{\Sigma\text{NPsIH} * 100}{\Sigma\text{TNPsI}};\ \text{Tallo} = \frac{\Sigma\text{NPsIT} * 100}{\Sigma\text{TNPsI}};\ \text{Raiz} = \frac{\Sigma\text{NPsIR} * 100}{\Sigma\text{TNPsI}}$$

$$\Sigma\text{TKI} = \Sigma\text{H}(40,80,160) + \Sigma\text{R}(40,80,160) + \Sigma\text{T}(40,80,160)$$

$$\Sigma\text{TNPsI} = \Sigma\text{H}(40,80,160) + \Sigma\text{R}(40,80,160) + \Sigma\text{T}(40,80,160)$$

Donde: KI= yoduro de potasio, NPsI= nanopartículas de yodo, H=hoja, T= tallo, R= raíz, dosis=40,80,160, ΣT= suma total

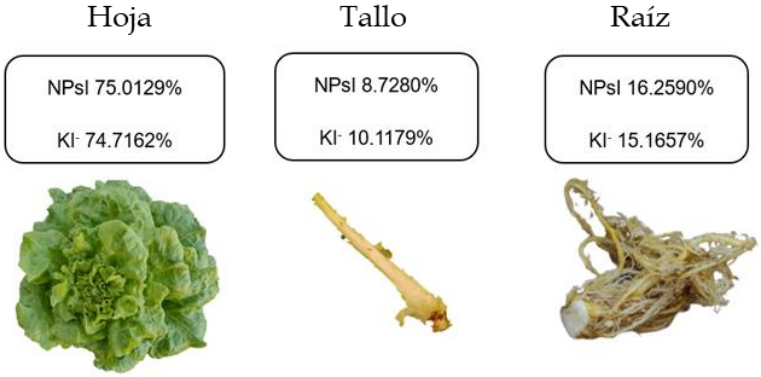


Figura 2. Patrón de distribución de yodo (Hoja, Tallo y Raíz) en respuesta a la aplicación foliar de Nanopartículas de yodo (NPsI) y Yoduro de potasio (KI^-) en lechuga cv. Butterhead.

El patrón de distribución del yodo muestra que en ambas fuentes de yodo la mayor concentración de este nutriente se dio en las hojas, seguido de raíz y tallo. Estos resultados son contrastantes con lo reportado por Caffagni *et al*. (2012) en cultivos de ciruela, nectarina, papa y tomate, con acumulaciones significativas de yodo, sobresaliendo el cultivo de tomate bajo sistema hidropónico con acumulaciones elevadas de 2423 µg de yodo en 100 gramos de fruto fresco. En todas las especies evaluadas, la mayor acumulación de yodo fue principalmente en hojas (Caffagni *et al*. 2012).

La mejor dosis de biofortificación se obtuvo con el tratamiento de nanopartículas (NPsI) a 40 µM, ya que se requiere consumir una menor cantidad de lechuga para alcanzar la ingesta diaria recomendada para cada estrato social (Cuadro 1).

CONCLUSIONES

La aplicación foliar de nanopartículas de yodo (NPsI) a dosis de 40 µM y 160 µM mejoró la acumulación de biomasa y el grado de biofortificación. Adicionalmente, las nanopartículas permitieron igualar los efectos obtenidos con el yoduro de potasio con un 50% en la disminución de la dosis. Con respecto al patrón de distribución del yodo con

aplicación foliar en las plantas de lechuga, la concentración fue de mayor a menor en hoja > raíz > tallo. Esto sugiere que la dosis óptima de 40 µM es la idónea para futuros programas de biofortificación.

Cuadro 1. Consumo de lechuga biofortificada con nanopartículas de yodo (NPsI) requeridas por estrato social para alcanzar la ingesta diaria recomendada (IDR).

Población	**(IDR) de yodo (I)**	**Consumo gramos de peso fresco de lechuga (NPsI) 40 µM**
Niños	120 µg	96.5745 g
Adultos	150 µg	120.7182 g
Mujeres (Embarazadas)	250 µg	201.197 g
Mujeres (Lactancia)	300 µg	241.4346 g

BIBLIOGRAFÍA

Blasco, B., Rios, J. J., Cervilla, L. M., Sánchez-Rodríguez, E., Rubio-Wilhelmi, M. M., Rosales, M. A., ... & Romero, L. (2010). Photorespiration process and nitrogen metabolism in lettuce plants (Lactuca sativa L.): induced changes in response to iodine biofortification. *Journal of Plant Growth Regulation*, *29*(4), 477-486.

Buturi, C. V., Mauro, R. P., Fogliano, V., Leonardi, C., & Giuffrida, F. (2021). Mineral biofortification of vegetables as a tool to improve human diet. *Foods*, *10*(2), 223. https://doi.org/10.3390/foods10020223.

Caffagni, A., Pecchioni, N., Meriggi, P., Bucci, V., Sabatini, E., Acciarri, N., Ciriaci, T., Pulcini, L., Felicioni, N., Beretta, M., & Milc, J. (2012). Iodine uptake and distribution in horticultural and fruit tree species. *Italian Journal of Agronomy*, 7(3), e32. https://doi.org/10.4081/ija.2012.e32.

Consentino, B. B., Vultaggio, L., Iacuzzi, N., La Bella, S., De Pasquale, C., Rouphael, Y., Ntatsi, G., Virga, G., & Sabatino, L. (2023). Iodine Biofortification and Seaweed Extract-Based Biostimulant Supply Interactively Drive the Yield, Quality, and Functional Traits in Strawberry Fruits. *Plants,* 12(2), 245. https://www.mdpi.com/2223-7747/12/2/245.

Duborská, E., Urík, M., & Šeda, M. (2020). Iodine biofortification of vegetables could improve iodine supplementation status. *Agronomy,* 10(10), 1574. https://doi.org/10.3390/agronomy10101574.

Jaiswal, D. K., Krishna, R., Chouhan, G. K., de Araujo Pereira, A. P., Ade, A. B., Prakash, S., ... & Verma, J. P. (2022). Bio-fortification of minerals in crops: current scenario and future prospects for sustainable agriculture and human health. *Plant Growth Regulation*, 98(1), 5-22. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.616868.

Kiferle, C., Martinelli, M., Salzano, A. M., Gonzali, S., Beltrami, S., Salvadori, P. A., Hora, K., Holwerda, H. T., Scaloni, A., & Perata, P. (2021). Evidences for a nutritional role of iodine in plants. *Frontiers in plant science,* 12, 616868. Li, R., Li, D. W., Liu, H. P., Hong, C. L., Song, M. Y., Dai, Z. X., Liu, J. W., Zhou, J., & Weng, H. X. (2017). Enhancing iodine content and fruit quality of pepper (*Capsicum annuum* L.) through biofortification. *Scientia Horticulturae,* 214, 165-173. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.030.

Passarelli, S., Free, C. M., Shepon, A., Beal, T., Batis, C., & Golden, C. D. (2024). Global estimation of dietary micronutrient inadequacies: a modelling analysis. *The Lancet Global Health,* 12(10), e1590-e1599.

Smoleń, S., Kowalska, I., Czernicka, M., Halka, M., Kęska, K., & Sady, W. (2016). Iodine and selenium biofortification with additional application of salicylic acid affects yield, selected molecular parameters and chemical composition of lettuce plants (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Frontiers in Plant Science,* 7, 1553.

Szarka, A., Tomasskovics, B., Bánhegyi, G., 2012. The ascorbate-glutathione-α-tocopherol triad in abiotic stress response. *Int. J. Mol. Sci.* 13(4), 4458-4483. https://doi.org/10.3390/ijms13044458.

Tallarita, A. V., Golubkina, N., De Pascale, S., Sękara, A., Pokluda, R., Murariu, O. C., Cozzolino, E., Cenvinzo, V., & Caruso, G. (2025). Effects of selenium/iodine foliar application and seasonal conditions on yield and quality of perennial wall rocket. *Horticulturae,* 11(2), 211. https://doi.org/10.3390/horticulturae11020211.

CARACTERISTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y NÚMERO DE ESPORAS DE HONGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES DE UN SUELO CAFETALERO CON MANEJO ORGÁNICO

Lucero Espinoza Sánchez[1]; Marco Antonio Martínez Palma[2]; Héctor Santos Luna Zendejas[1]; Jaime Marcial Quino[3]; Juan Ángel Tinoco Rueda[4]

[1] Maestría en Ciencias en Sistemas del Ambiente, Centro de Investigación en Genética y Ambiente-UATx. Km 10.5 Autopista San Martin-Tlaxcala, C.P. 90120. Ixtacuixtla, Tlaxcala.
[2] Licenciatura en Biología, UATx. Km 10.5 Autopista San Martin-Tlaxcala, C.P. 90120. Ixtacuixtla, Tlaxcala.
[3] Universidad Autónoma de la Ciudad de México. Ermita Iztapalapa Lomas de Zaragoza, Iztapalapa. C.P. 09620. Ciudad de México, CDMX.
[4]Centro Académico Regional sede Huatusco, Carr. Federal Huatusco - Xalapa Km. 6.5. C.P. 94100. Huatusco, Veracruz.

Correo del autor de correspondencia: hslunaz@uatx.mx

RESUMEN

El café (*Coffea arabica* L.) es uno de los cultivos más importantes en México, especialmente el que se produce bajo manejo orgánico. El estado de Veracruz produce en su mayoría café orgánico, siendo Huatusco la región que destaca, al conservar el bosque mesófilo de montaña y promover su biodiversidad. En este contexto, se determinaron algunas características edáficas del suelo rizósferico de plantas de café y cómo el manejo orgánico impacta en el número de esporas de hongos endomicorrízicos arbusculares. Se recolectaron muestras de suelo de la zona rizosférica de cinco plantas de café de la var. Geisha. En laboratorio se determinó textura, densidad aparente, pH, materia orgánica, nitrógeno inorgánico, fósforo disponible y el número de esporas de hongos endomicorrízicos arbusculares. Los resultados mostraron que un manejo orgánico constante permite que los suelos presenten una densidad aparente de 0.93 g cm^{-3}, textura franco-arenosa, pH moderado ácido, contenido medio de materia orgánica (6.9%), un valor alto de fósforo disponible y respecto al número de esporas de HMA se tuvo un promedio de 2 340 esporas en 50 g de suelo. Estos resultados sugieren que un manejo orgánico prolongado bajo sombra favorece la abundancia de hongos endomicorrízicos arbusculares, lo que contribuye a la nutrición, protección y desarrollo de las plantas de café.

PALABRAS CLAVE: *Coffea arabica; manejo sostenible; propiedades del suelo*; *sistema de producción agroforestal*.

INTRODUCCIÓN

El café es una de las bebidas más consumidas a nivel mundial, México ocupa el onceavo lugar entre los países productores, con una exportación de aproximadamente 28 000 ton, principalmente hacia la Unión Europea (SIAP, 2024). Se cultivan alrededor de 703 943 ha de café, siendo Chiapas el principal productor con 392 903 ton (37.2%), seguido de Veracruz con 256 256 ton (24.3%) y Puebla con 228 006 ton (21.6%). Estos tres estados

representan en conjunto el 83.1% de la producción nacional (SADER, 2024). Veracruz cuenta con diez regiones dedicadas al cultivo de café, destaca la región de Huatusco como la más importante en términos de producción. Martínez-López *et al*. (2022) reportan que en este municipio el rendimiento has sido de 1.8 ton ha^{-1} y representa el segundo cultivo con mayor producción, superado por la caña de azúcar. Particularmente el café se cultiva bajo un sistema orgánico con sombra de árboles nativos del género *Inga sp.* y *Grevillea robusta* (Escamilla y Díaz, 2016).

Coffea arabica, es una especie de la más cultivada a nivel mundial, cuenta con diferentes variedades, entre ellas la var. Geisha, la cual es originaria de Etiopía, reconocida por su alta calidad en taza y resistente a la roya (*Hemileia vastatrix*). Es una planta de porte alto que supera los 3 m, con ramas laterales en forma de "S" y hojas oblongo-elípticas de color verde oscuro. Sus flores son aromáticas con notas de jazmín y cítricos; mientras que, sus frutos son drupas ovaladas de maduración tardía. Inicia su producción a los 1.5 años, su máximo rendimiento lo alcanza entre 6 y 8 años. Requiere climas frescos con temperaturas promedio de 17 a 25.3 °C, se cultiva a altitudes superiores a los 1 200 m s.n.m., con sombra parcial para mantener su sanidad y follaje, además se puede desarrollar en suelos con bajas concentraciones de nitrógeno, potasio y fósforo (Silva Rincón *et al*., 2024).

La planta de café es altamente micotrófica, esta característica le permite formar una asociación simbiótica eficiente con los hongos micorrízicos arbusculares (HMA), mejorando la absorción de nutrimentos, como fósforo y nitrógeno, así como de agua. Esta relación ayuda a fortalecer su crecimiento y desarrollo, especialmente en suelos ácidos y pobres en nutrimentos. Esta simbiosis ayuda a la panta a resistir el estrés del trasplante, incrementa la tolerancia a enfermedades y plagas, se reduce el uso de agroquímicos, lo que favorece la sostenibilidad biológica del cultivo y, por lo tanto, puede mantenerse sana, productiva y con mejor calidad de una manera más ecológica y económica (Hernández-Acosta *et al*., 2021).

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo consistió en determinar algunas características físicas y químicas del suelo rizosférico de la var. Geisha bajo manejo orgánico y su impacto en el número de esporas de HMA.

MATERIALES Y MÉTODOS

El municipio de Huatusco se localiza en la región denominada "Las Montañas", en la zona central del estado de Veracruz, entre las latitudes 19° 04' y 19° 13' N y las longitudes 96° 41' y 97° 04' O. Su territorio presenta un relieve predominantemente montañoso que se extiende de norte a sur, formando parte del Eje Neovolcánico. El clima predominante es semicálido subhúmedo, cubriendo un 57% de la superficie, mientras que, el templado húmedo abarca un 20%. La precipitación anual promedio varía entre 1 700 y 2 000 mm (INEGI, 2010). La parcela de la variedad Geisha se encuentra dentro del Centro Académico Regional (CAR) sede Huatusco, de la Universidad Autónoma de Chapingo, a una altitud de 2 135 msnm, en las coordenadas 19º 17' 47" LN - 96º 96' 45" LO. Esta parcela tiene un manejo de producción orgánico bajo sombra que ha permanecido durante 45 años. Las especies de sombra que se encuentran presentes destacan *Inga sp. y*

Grevillea robusta. El manejo incluye un control manual de maleza, control de la broca del café con atrayentes, la aplicación de estiércol y composta como enmiendas orgánicas.

Se seleccionaron al azar dentro de la parcela cinco plantas de la var. Geisha, en cada planta se delimitó la zona de goteo, estableciendo cuatro puntos alrededor de su periferia. En estos puntos se retiró la hojarasca y se recolectaron muestras de suelo rizosférico a una profundidad de 0 a 20 cm. En total, 20 muestras simples, que se integraron en 5 muestras compuestas (Moreno Gelvez & Santos, 2020). Posteriormente, las muestras se colocaron sobre papel Kraft para su secado a temperatura ambiente y protegidas de la luz solar, después se tamizaron usando un tamiz de malla de apertura de 2 mm para uniformar el tamaño de partícula. A cada muestra se le analizaron textura, densidad aparente, pH, contenido de materia orgánica y fósforo disponible, siguiendo los procedimientos establecidos por la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002).

La extracción de esporas se llevó a cabo mediante la técnica de tamizado en húmedo, decantación y centrifugación en gradientes de sacarosa, siguiendo la técnica de Brundrett (2009). Se homogeneizó el suelo y tomó una muestra de 50 g, la cual se colocó en un vaso de precipitado de 1 L con agua corriente. La muestra fue agitada vigorosamente hasta obtener una suspensión de partículas, la cual se dejó reposar 40 s. Transcurrido el tiempo, las suspensiones se vertieron cuidadosamente en un juego de tamices con diferente apertura de malla, ordenados de forma descendente (0.500, 0.212, 0.106 y 0.045 mm). El contenido retenido en el primer tamiz (0.500 mm) fue desechado, el de los otros tamices se centrifugó en tubos con sacarosa al 20% y 60% a 3500 r.p.m. durante cinco min, posteriormente el sobrenadante se depositó en una caja de Petri para realizar la extracción de las esporas de los HMA a través de un microscopio estereoscópico.

Al conjunto de datos obtenidos se le aplicó una estadística descriptiva, para identificar tendencias del comportamiento de los datos, con el programa estadístico InfoStat versión libre 2020.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos cafetaleros de los árboles de la var. Geisha bajo manejo orgánico presentaron características físicas y químicas favorables para el desarrollo del cultivo y la actividad microbiológica. La densidad aparente fue < 1.0 g cm^{-3} (Cuadro 1), valor propio para suelos volcánicos. Estos resultados coinciden con lo señalado por Velmourougane (2016), quien reportó que los suelos con manejo orgánico presentaron menor compactación y mayor capacidad de retención de agua, respecto a los sistemas convencionales. En cuanto a la textura, predominó la fracción arena, seguida de arcilla y limo, lo que indica una buena porosidad y adecuada aireación en el suelo.

El pH se clasificó como moderadamente ácido (5.1 – 6.5) con base en la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002), encontrándose dentro del intervalo óptimo para el desarrollo de diversas especies de HMA, particularmente del género *Acaulspora* (Robles-González *et al*., 2023). Además, el contenido de materia orgánica fue considerado medio (6.1 a 10.9%), lo que proporciona una fuente constante de carbono que favorece la actividad microbiológica y la simbiosis micorrízica (Velmourougane, 2016; Hernández-Acosta *et al*., 2021).

Respecto al fósforo disponible se presentaron valores altos (<30 mg kg^{-1}) de acuerdo con la NOM-021, lo que indica que el suelo presenta condiciones químicas aptas para el desarrollo del cultivo y de los microorganismos. Cabe destacar que, a pesar de los niveles elevados de fósforo, se registró una media del No. de esporas de HMA (Cuadro 1), un número considerablemente alto en comparación con lo reportado por Robles-González *et al*. (2023), quienes encontraron una abundancia de 139 ± 3.7 esporas en 50 g de suelo en un cafetal orgánico de Chiapas. Esta diferencia puede atribuirse a diversos factores, entre ellos, el prolongado periodo de manejo orgánico (45 años), la altitud (> 2 130 msnm) y la presencia del arbolado forestal, los cuales inciden positivamente en la estabilidad microclimática, la disponibilidad de nutrimentos y la diversidad biológica del suelo.

Cuadro 1. Estadística descriptiva de las variables medidas.

Parámetro	Media	DE	CV	Mínimo	Máximo
Densidad aparente (g cm^{-3})	0.93	0.06	6.13	0.85	1.00
Arcilla (%)	15.10	7.45	49.35	5.80	23.71
Limo (%)	12.82	2.50	19.50	8.82	15.69
Arena (%)	72.09	8.70	12.07	63.34	85.38
pH	5.77	0.46	7.95	5.01	6.14
Materia orgánica (%)	6.91	1.20	17.39	5.56	8.23
Fósforo (mg kg^{-1})	55.56	4.64	8.34	49.22	61.55
No. esporas	2340	314.35	13.43	2003	2697

DE(desviación estándar) CV (Coeficiente de variación).

Diversos estudios han demostrado que los sistemas de producción orgánicos promueven una mayor diversidad y abundancia de HMA en comparación con los convencionales. En este sentido, Velmourougane (2016) reportó una mayor actividad microbiana, respiración del suelo y diversidad microbiológica en cafetales orgánicos; mientras que, Trejo *et al*. (2011) y Hernández-Acosta *et al*. (2021) han documentado una alta frecuencia de géneros como *Acaulospora, Glomus* y *Rhizophagus* en la rizosfera de cafetos cultivados bajo sombra.

CONCLUSIONES

El manejo orgánico bajo sombra en cafetales de la variedad Geisha en Huatusco, Veracruz, tiene condiciones edáficas óptimas para el cultivo, baja densidad aparente, textura adecuada y pH moderadamente ácido, además de un contenido medio de materia orgánica y altos niveles de fósforo disponible. Características edáficas que favorecen la abundancia de los HMA en el suelo. Se resalta la importancia del manejo orgánico prolongado, debido a que contribuye no solo a la nutrición, sino al mantenimiento de la biodiversidad de los HMA.

BIBLIOGRAFÍA

Brundrett, M. (2009). Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: Understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis. *Plant and Soil,* 320, 37-77. https://doi.org/10.1007/s11104-008-9877-9.

Escamilla, P., & Díaz, S. (2016). Café bajo sombra en Veracruz: sistemas agroforestales con especies nativas y exóticas. *Revista Mexicana de Agroforestería*, 7(13), 35–47.

Gelvez Pardo, I. M., Moreno Rodríguez, J. M., & Santos Díaz, A. M. (2020). Guía de muestreo de suelo para análisis microbiológico. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7404098.

Hernández-Acosta, E., Banuelos, J., y Trejo-Aguilar, D. (2021). Distribución y efecto de los hongos micorrízicos en el agroecosistema de café. *Revista de Biología Tropical*, 69 (2), 445-461. https://doi.org/10.15517/rbt.v69i2.42256.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010 Huatusco. Veracruz de Ignacio de la Llave. 10 p. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30071.pdf.

Martínez-López, A., Cruz-León, A., Sangerman-Jarquín, D. M., Díaz Cárdenas, S., Cervantes Herrera, J., y Ramírez-Valverde, B. (2022). Prevalencia de los saberes tradicionales en las unidades de producción de café de la región Huatusco, Veracruz, México. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 5(1), 1172–1185. https://www.aacademica.org/artemio.cruz.leon/96.

Robles-González, K. K., Álvarez-Solís, J. D., Bertolini, V., & Pérez-Luna, Y. C. (2023). Diversidad y propagación de hongos micorrízicos arbusculares nativos de un cafetal orgánico en Chiapas, México. *Revista Fitotécnica Mexicana*, 46 (2), 147–155. https://doi.org/10.35196/rfm.2023.2.147.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2024). México, onceavo productor mundial de café. Gobierno de México. 16 de marzo de 2025, de https://www.gob.mx/agricultura/articulos/mexico-onceavo-productor-mundial-de-cafe

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2002). Norma oficial mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). Escenario mensual de productos agroalimentarios. Café cereza. 15 de agosto de 2024.

Silva Rincón, C. I., Alarcón Gutiérrez, E., García Pérez, J. A., Sánchez-Velásquez, L. R., & Iglesias Andreu, L. G. (2024). La variedad de café Geisha y su estatus en el mundo y en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15 (7). https://doi.org/10.29312/remexca.v15i7.3403.

Trejo, D., Gutiérrez, C., & Rodríguez, M. A. (2011). Diversidad de hongos micorrízicos arbusculares en cafetales del centro de Veracruz, México. *Revista Mexicana de Micología*, 34, 27–35.

Velmourougane, K. (2016). Impact of organic and conventional systems of coffee farming on soil properties and culturable microbial diversity. *Scientifica*, 2016, ID 3604026. https://doi.org/10.1155/2016/3604026.

COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO DEL MAÍZ H-443A EN TRES CLASES TEXTURALES DE SUELO EN COLIMA, MÉXICO

Humberto Saltos Maldonado[1]; Rafael Julio Macedo Barragán[1]; Wilberth Chan Cupul[1]; José Manuel Gutiérrez Campos[1]

[1] Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Colima. Autopista Colima-Manzanillo km 40, CP. 28930, Tecomán, Colima, México.

Correo del autor de correspondencia: jgutierrez80@ucol.mx

RESUMEN

Las condiciones edáficas como la clase textural afectan el crecimiento y rendimiento del maíz, por lo que, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el comportamiento productivo del maíz amarillo H-443A cultivado en tres clases texturales de suelo en Armería, Colima. Se establecieron tres lotes de producción de semilla del híbrido comercial trilineal de maíz amarillo H-443A (macho LRB-3A y hembra la cruza simple LRB-1A × LRB-2A) en tres parcelas con diferentes clases texturales (Franco arcillo arenoso, Franco arenoso y Franco arcilloso). El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con cinco repeticiones. La altura de la planta y la mazorca de la línea hembra LRB-1A × LRB-2A fue significativamente mayor cuando se sembró en suelo franco arcilloso. Además, la siembra de la línea hembra LRB-1A × LRB-2A en esta clase textural del suelo provocó un mayor rendimiento significativamente del híbrido H-443A. Asimismo, el peso del grano fue significativamente mayor en el maíz sembrado en este suelo, mientras que el número de granos por mazorca fue similar. La siembra en la clase textural franco arcilloso mejora el crecimiento del maíz de la cruza simple LRB-1A × LRB-2A y permite el incremento productivo del maíz amarillo H-443A.

PALABRAS CLAVE: *crecimiento; producción de grano; rendimiento de grano; Zea mays.*

INTRODUCCIÓN

Este cereal se cultiva en todas las regiones ecológicas y edáficas del país, siendo los estados de Sinaloa, Jalisco, Michoacán, México y Guanajuato los principales productores. Durante el año 2024, en el estado de Colima se destinaron al cultivo del maíz 12 451.50 ha de las cuales se obtuvo una producción de 50 415.92 t de grano, con un rendimiento promedio de 4.05 t ha^{-1} con una variación de 2.80 t ha^{-1} en el municipio de Manzanillo a 4.73 t ha^{-1} en el de Coquimatlán (SIAP, 2025).

Como en cualquier cultivo, uno de los factores que afecta el rendimiento del maíz son las características del suelo en el cual se establece ya que este proporciona soporte físico y actúa como fuente de agua y nutrientes para la planta, lo que, a su vez, depende de sus propiedades físicas y químicas (Burbano-Orjuela, 2016; Silver *et al*., 2021). En este sentido, el maíz se adapta a una amplia variedad de suelos, siendo los más idóneos para su cultivo los fértiles, bien drenados, profundos, con elevada capacidad de retención para el agua y de textura media (francos).

En el estado de Colima, no obstante que el maíz es el principal cultivo de ciclo anual y que existen una gran diversidad de unidades de suelo entre las que predominan los

cambisoles, feozems, fluvisoles, leptosoles, regosoles y vertisoles, con su diversidad de clases texturales (INEGI, 2025), no existen estudios sobre su rendimiento y su relación con la clase textural del suelo, por lo que, bajo este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el comportamiento productivo del maíz amarillo H-443A cultivado en tres clases texturales de suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental. El estudio se realizó en el ciclo otoño-invierno del 2025 en tres parcelas experimentales con diferentes clases texturales determinado a 20 cm de profundidad del suelo (DOF, 2002) y localizadas en el ejido El Banco ubicado la localidad de Rincón de López, municipio de Armería, Colima (Franco arcillo arenoso [arcilla: 26.12%, limo: 23.44%, arena: 50.44%] 19° 05' 20" N - 103° 54' 23" O), Franco arenoso [arcilla: 4.68%, limo: 22.00%, arena: 73.32%] 19° 05' 40" N - 103° 54' 36" O y Franco arcilloso [arcilla: 28.12%, limo: 36.00%, arena: 35.88%] 19° 04' 21" N - 103° 54' 40" O).
El clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano, representado por la fórmula Aw0(w) (García, 2004). Durante el periodo de estudio (diciembre 2024 – abril 2025) no se registraron precipitaciones; la temperatura media fue de 24.9 °C, con máximas y mínimas que fluctuaron entre los 33.9 y 15.6 °C (Figura 1).

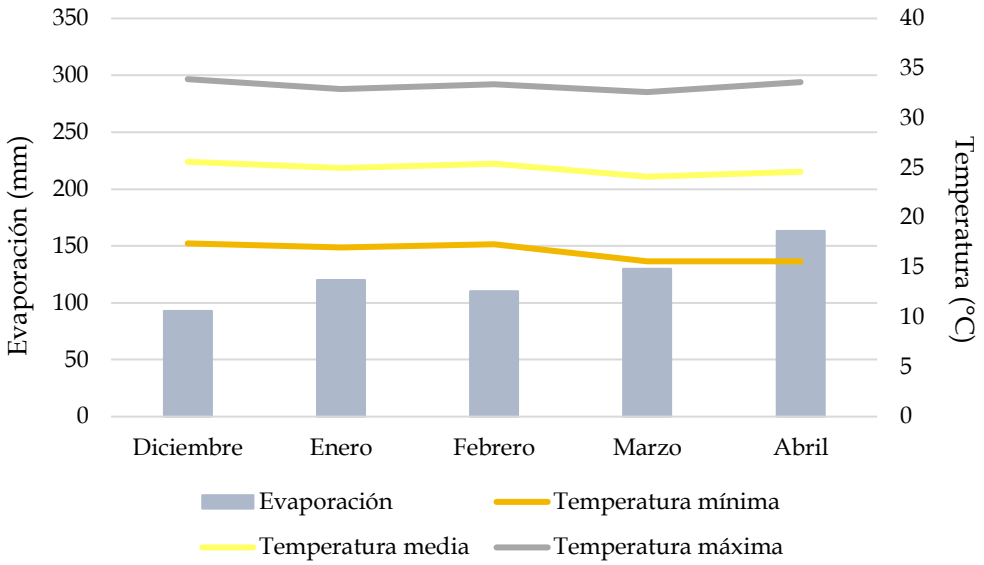


Figura 1. Climograma del ejido El Banco, Armería, Colima durante el periodo de realización del estudio (Diciembre 2024 – Abril 2025). Fuente: SMN (2025).

Material vegetal. Se establecieron tres lotes de producción de semilla del híbrido comercial trilineal de maíz amarillo H-443A (Semillas Insurgentes, Colima, México) desarrollado para la producción de grano y forraje. Como progenitores masculino y femenino se utilizaron las líneas LRB-3A y la cruza simple LRB-1A × LRB-2A respectivamente.

Diseño experimental. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar con cinco repeticiones. La unidad experimental fue una parcela con ocho surcos de 5 m de longitud y 0.75 m de separación. Las líneas parentales se sembraron a una relación hembra:macho de 3:1 por lo que cada parcela experimental constó de seis surcos de planta macho y 2 de planta hembra. La línea macho se sembró a una densidad de 97,977 plantas ha^{-1} (13.6 cm entre plantas) y la línea hembra se sembró tres días después a una densidad de 92 213 plantas ha^{-1} (14.4 cm entre plantas).

Manejo agronómico. El cultivo se desarrolló bajo condiciones de riego y la siembra se realizó en suelo húmedo. La fertilización se realizó en tres etapas: a la siembra se aplicó una dosis de fertilización de 30-23-15 y a los 25 y 65 días post-emergencia (DPE) una dosis de 52.5-00-00 y 115-00-00 respectivamente. El control de malezas se realizó a los 65 DPE con la aplicación de 1.5 L ha^{-1} del herbicida Tarang Ultra® adicionado con 3 kg de sulfato de amonio. Se efectuó un control preventivo de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) con aplicaciones semanales de 200 mL ha^{-1} de Denim 19 CE® combinado con 1.5 kg ha^{-1} de fertilizante foliar triple 19 iniciando a los 10 DPE.

Variables de respuesta. Al momento de presentarse un 50% de floración se registró la altura de planta (AP) y mazorca (AM). La cosecha se registró a los 150 días después de la siembra y se seleccionaron 10 mazorcas de cada unidad experimental para medir los siguientes componentes del rendimiento: granos por mazorca (GM), peso de grano (PG) y rendimiento de grano (RG).

Análisis estadístico. Los datos se sometieron a un análisis de varianza (ANDEVA) y las medias se compararon con la prueba
de Tukey ($P < 0.05$). Los análisis de realizaron con el software SPSS versión 25.0 para Windows.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La altura de la planta y la mazorca de la línea hembra LRB-1A × LRB-2A fue significativamente mayor cuando se sembró en suelo franco arcilloso. Además, la siembra de la línea hembra LRB-1A × LRB-2A en esta clase textural del suelo provocó un mayor rendimiento significativamente del híbrido H-443A (Cuadro 1). Asimismo, el peso del grano fue significativamente mayor en el maíz sembrado en este suelo, mientras que el número de granos por mazorca fue similar (Cuadro 1).

Cuadro 1. Altura de planta (AP), altura de mazorca (AM) de la línea LRB-1A × LRB-2A y granos por mazorca (GM), peso de grano (PG) y rendimiento de grano (RG) del maíz híbrido H-443A.

Clase textural	AP (cm)	AM (cm)	GM	PG (g)	RG (t ha^{-1})
Franco arcillo arenoso	174.21 b	103.97 b	550.34 a	155.56 c	9.68 c
Franco arenoso	179.25 b	97.35 c	577.64 a	178.90 b	11.14 b
Franco arcilloso	195.87 a	111.38 a	576.40 a	198.76 a	12.37 a
EEM	2.0292	1.7053	9.2408	3.6085	0.2246
P-valor	<0.001	<0.001	0.0651	<0.001	<0.001

Promedios con la misma letra en cada columna, no difieren estadísticamente según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

La altura de la planta de la línea hembra LRB-1A x LRB-2A en los tres sitios evaluados estuvo dentro del rango de referencia de entre 191 a 220 cm indicado por Reyes *et al*. (2009), ya que dichos valores se registraron midiendo la planta desde el suelo hasta la punta de la espiga (la cual puede tener una longitud mayor a 28 cm), mientras que en el presente estudio la altura se tomó hasta el ápice de la planta. Asimismo, la altura de la inserción de la mazorca fue mayor en todos los casos, que la indicada por Cantú *et al*. (2009) quienes indican un rango que va de los 61 a los 80 cm.

El rendimiento de grano fue mayor en la parcela con suelo de textura franco-arcillosa lo que coincide con los hallazgos de Meng *et al*. (2002), quienes estudiaron el rendimiento de grano en la zona de suelos Phaeozems en China y registraron un rendimiento de 11.44 t ha^{-1}, mientras que en los suelos franco-arenosos fue de 8.25 t ha^{-1}. Estos autores indican que esto se debe a que los suelos franco-arcillosos presentaron una mayor retención de agua y capacidad de amortiguación contra la pérdida de agua por evapotranspiración que los suelos franco-arenosos por lo que los cultivos establecidos en estos suelos son más vulnerables al estrés hídrico. Asimismo, explican que la pérdida de N por lixiviación y la volatilización y desnitrificación de NH_3 fue mayor en los suelos franco-arenosos, mientras que la absorción y eficiencia de uso de N fue mayor en los suelos franco-arcillosos, lo que resulta importante en un cultivo altamente demandante de N como es el maíz.

En otro estudio realizado por Fang y Su (2019) se concluyó que el rendimiento de grano en el maíz se incrementa al aumentar la concentración de arcilla y limo en el suelo, lo cual es consistente con los hallazgos del presente trabajo. Asimismo, estos autores indican que en los suelos con mayor concentración de arcilla y limo se incrementa la productividad del agua de riego que se define como el rendimiento producido por unidad de agua de riego utilizada y la absorción de nitrógeno por la planta lo cual influye también en el rendimiento de grano mientras que en los suelos con alto contenido de arena se incrementa la pérdida del agua del suelo y del nitrógeno proveniente del fertilizante principalmente por percolación profunda cuando se usa riego por inundación como en el presente estudio.

CONCLUSIONES

La siembra en la clase textural franco arcilloso mejora el crecimiento del maíz de la cruza simple LRB-1A × LRB-2A y permite el incremento productivo del maíz amarillo H-443A.

BIBLIOGRAFÍA

Burbano-Orjuela, H. (2016). El suelo y su relación con los servicios ecosistémicos y la seguridad alimentaria. *Revista de Ciencias Agrícolas*, *33*(2), 117-124. http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58.

Cantú, A. M. A., Reyes, M. C. A., de la Garza, C. M., & Vázquez, C. G. (2009). H-443A, híbrido de maíz amarillo para el noreste de México, Folleto Técnico MX-0-310302-25-03-13-09-42. (pp. 10-15). Tamaulipas, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

DOF. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. http://dof.gob.mx/nota-detalle.php?codigo=717582&.

Fang, J., & Su, Y. (2019). Effects of soils and irrigation volume on maize yield, irrigation water productivity, and nitrogen uptake. *Scientifics Reports*, *9*, 7740. https://doi.org/10.1038/s41598-019-41447-z.

García, E. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). (2025). Edafología. Consultada el 20 de mayo, 2025, desde https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/.

Meng, F., Hu, K., Feng, P., Feng, G., & Gao, Q. (2022). Simulating the effects of different textural soils and N management on maize yield, N fates, and water and N use efficiencies in Northeast China. *Plants*, *11*, 3338. https://doi.org/10.3390/plants11233338.

SMN. (Servicio Meteorológico Nacional). (2025). Información estadística climatológica. Consultado el 18 de junio, 2025, https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales_Climatologicas/Mensuales/col/mes06017.txt

Reyes, M. C. A., Cantú, A. M. A., de la Garza, C. M., Vázquez, C. G., & Córdova, O. H. (2009). H-443A, híbrido de maíz de grano amarillo para el noreste de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *32*(4), 331-333. https://doi.org/10.35196/rfm.2009.4.33.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2025). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Consultada el 15 de abril de 2025, desde https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/.

Silver, W. L., Perez, T., Mayer, A., & Jones, A. R. (2021). The role of soil in the contribution of food and feed. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, *376*, 20200181. https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0181.

COMPOSICIÓN NUTRIMENTAL DEL SEDIMENTO DE TILAPIA Y SU IMPACTO EN LA FERTILIDAD DE SUELOS DEGRADADOS

Edgar Alejandro Martínez Palma[1]; Elizabeth Hernández Acosta[2]; Elizabeth García Gallegos[3]; Aldo Iram Leal Mendoza[1]

[1] Licenciatura en Biología, Facultad de Agrobiología-UATx. Km. 10.5 Aut. Tlaxcala-San Martín. Ixtacuixtla, Tlaxcala. C.P. 90120.
[2] Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Suelos. Texcoco, Estado de México. C.P. 56230.
[3] Centro de Investigación en Genética y Ambiente-UATx. Km. 10.5 Aut. Tlaxcala-San Martín. Ixtacuixtla, Tlaxcala. C.P. 90120.

Correo del autor de correspondencia: aldoiram.lealmendoza@uatx.mx

RESUMEN

La degradación del suelo afecta su capacidad para tener una producción sostenible, ya que crea condiciones de estrés que impiden un desarrollo adecuado de las plantas para mejorar su calidad, una alternativa es el uso de sedimentos acuícolas. Por lo que el objetivo del presente trabajo consistió en caracterizar el sedimento de la producción de tilapia y evaluar su efectividad en las propiedades físicas, químicas y biológicas de tepetates. Se estableció un diseño completamente al azar con un arreglo factorial 3x3, tres tipos de tepetate (Ixtacuixtla, Reyes y Metepec) y tres concentraciones de sedimento de tilapia (25, 50 y 75%) bajo condiciones de invernadero por 60 días. Al sedimento como al tepetate se les determinó densidad aparente, pH, materia orgánica, conductividad eléctrica, nitrógeno inorgánico, fósforo y actividad microbiana. Al final del experimento se obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$), en el tepetate del sitio Reyes se incrementó el pH y la conductividad eléctrica con el 50% y 75% del sedimento. Mientras que, la densidad aparente, materia orgánica, fósforo y actividad microbiana con el 75% del sedimento en el tepetate del sitio Ixtacuixtla. Respecto al nitrógeno inorgánico, no se tuvieron diferencias significativas ($p > 0.05$), aun así, se observa la misma tendencia, a mayor concentración de sedimento se tiene un aumento en la concentración de nitrógeno. Con base en estos resultados se considera que es factible utilizar sedimentos de origen acuícola para mejorar las condiciones de fertilidad de los tepetates y con ello su componente físico.

PALABRAS CLAVE: *acuicultura; propiedades edáficas; rehabilitación; tepetate.*

INTRODUCCIÓN

La degradación del suelo es una de las principales amenazas ambientales, en el estado de Tlaxcala, Bolaños *et al*. (2016) reportan que el 92.9% de su superficie presenta erosión, lo que ha traído como consecuencia la pérdida de la estructura del suelo, compactación, cambios en el pH, disminución de la materia orgánica y lixiviación de nutrimentos, lo que repercute en una degradación, dando como consecuencia el afloramiento del sustrato endurecido denominado "tepetate", definido como un material de origen ígneo de alta densidad aparente, baja porosidad, conductividad hidráulica y retención de humedad,

siendo un problema desde el punto de vista para el manejo, debido a que sus capas endurecidas, dificultan la labranza, impiden la infiltración del agua y favorecen el escurrimiento lateral (Gama *et al*., 2007).

Para rehabilitar estas áreas con degradación se reportan diferentes estrategias, entre las que destacan la roturación y aplicación de abonos orgánicos (Báez-Pérez *et al*., 2002), la plantación de especies leñosas perennes complementada con cobertura de herbáceas y excavación de zanjas de infiltración (García *et al*., 2024), la micorriza arbuscular en asociación con árboles frutales (Flores-Román *et al*., 2011) y el uso de hidrogeles orgánicos para favorecer la retención de humedad (Gutiérrez Pérez *et al*., 2023). En este sentido, los sedimentos de origen acuícola pueden ser una opción viable para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del tepetate e incrementar su fertilidad, debido a su alto valor nutrimental en términos de materia orgánica, N y P (Calderón-Medina *et al*., 2018), el cual varía de acuerdo con el sistema de producción, biomasa, especie, manejo y alimentación, así como a la digestibilidad (Dróżdż *et al*., 2019).

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo consistió en caracterizar el sedimento de un ciclo de producción de tilapia y evaluar su efectividad en la mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas de tepetates.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sedimento de tilapia fue colectado en la Granja Acuícola de la Facultad de Agrobiología de la Universidad Autónoma de Tlaxcala (19° 19' 52 N'' y 98° 21' 56 O'' a 2 241 m s.n.m.) de producción semi-intensiva a pequeña escala, donde se cultiva tilapia (*Oreochromis* sp.). La granja cuenta con un jagüey semi-rústico que al final del ciclo de producción los sedimentos son removidos y depositados al exterior, de donde fue tomada directamente la muestra para el experimento. Se colectaron diferentes tepetates dentro del estado de Tlaxcala, sitio Ixtacuixtla (19°20'0'' N y 98°21'57'' W a 2 241 msnm), en el municipio de Ixtacuixtla. El sitio San Diego Metepec, Tlaxcala (19°16'25'' N y 98°15'28'' W a 2 349 msnm) y el sitio Los Reyes, Totolac (19º 17' 04.9'' N y 98º 06' 12.8'' W a 2 330 msnm).

La muestra de sedimento se secó en charolas de plástico a temperatura ambiente y a la sombra por 72 h y posteriormente se tamizó por malla de 0.5 mm. Los tepetates mismas condiciones por 24 h, al término se pasaron por malla 2 mm. Tanto al sedimento como a los tepetates se les determinó el pH, materia orgánica, conductividad eléctrica, N inorgánico, P disponible y densidad aparente; textura, solo al tepetate, todo de acuerdo con los métodos de la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002). La actividad microbiana se obtuvo a través del método de incubación en medio cerrado (CO_2) descrito por Anderson (1982).

Se estableció bajo condiciones de invernadero un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial 3 x 3, del cual un factor corresponde a los tres tipos de tepetates (Ixtacuixtla, Metepec y Reyes) y el otro a las concentraciones de sedimento (25, 50 y 75%) en total 9 tratamientos, 3 repeticiones cada uno, un total de 27 unidades experimentales en macetas de plástico de una capacidad de 1 kg, bajo las mismas condiciones de humedad por 60 días. Al término se determinó el pH, materia orgánica,

conductividad eléctrica, N inorgánico, P disponible, densidad aparente y la actividad microbiana.

El análisis de los datos consistió en verificar la normalidad por la prueba de Shapiro-Wilk ($p>0.05$), posterior un análisis de varianza y una prueba de medias de Tukey ($p<0.05$) para identificar diferencias significativas entre tratamientos, de acuerdo al modelo lineal, $Y_{ijk}= \mu+ T_i+ S_j+ (TS)_{ij}+ \varepsilon_{ijk}$, donde: Y_{ijk}= variable respuesta, μ = efecto de la media, T_i= efecto de la media por el nivel i del factor tepetate (T), S_j= efecto de la media por el nivel j del factor sedimento de tilapia (S), $(TS)_{ij}$ =efecto de la media causado por la interacción del nivel i del factor T y del nivel j del factor S, ε_{ijk}= error experimental asociado al efecto de cada factor. Todo a través del paquete estadístico InfoStat, versión libre 2020.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sedimento de tilapia presentó un pH cercano a la neutralidad, una densidad aparente < 1 g cm^{-3}, bajo contenido de sales y una concentración superior de materia orgánica, fósforo y nitrógeno inorgánico, lo que le confiere un importante valor nutrimental (Cuadro 1). Burducea *et al*. (2022) refieren que la cantidad de nutrimentos en sedimentos de origen acuícola varía con la biomasa y el sistema de producción, por lo que es recomendable analizar su contenido nutrimental previo a su uso.

Respecto a los tepetates, existe un predominio de la fracción arena, seguido de limo y arcilla, la densidad aparente fue ligeramente superior a 1 g cm^{-3}, bajo contenido de materia orgánica y nutrimental de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002), así como de actividad microbiana, respecto esta al sedimento acuícola, la cual fue superior.

Cuadro 1. Composición física y química de los tepetates y sedimento acuícola previo a establecer el experimento.

Parámetro	Tepetate Metepec	Tepetate Reyes	Tepetate Ixtacuixtla	Sedimento acuícola
Arcilla (%)	4.7	8.5	10.46	nd
Arena (%)	82.4	71.7	78.04	nd
Limo (%)	12.8	19.7	11.5	nd
Densidad aparente (g cm^{-3})	1.09	1.08	1.1	0.86
Materia orgánica (%)	0.78	1.02	1.2	31.6
pH	6.95	7.54	6.6	6.5
Conductividad eléctrica (dS m^{-1})	0.01	0.02	0.04	0.01
Fósforo (mg kg^{-1})	2.65	2.15	2.98	3.60
N inorgánico (mg kg^{-1})	49.49	34.64	54.44	1153.1
Actividad microbiana (mg C-CO_2 kg^{-1} suelo $día^{-1}$)	61.1	58.5	99	1345.78

Nota: nd = no determinada.

En el análisis de varianza, el factor tepetate y la concentración de sedimento mostraron diferencias significativas ($p<0.05$) para densidad aparente y conductividad eléctrica. En

los tratamientos con 25% de sedimento en el tepetate Ixtacuixtla, el valor de la densidad aparente fue significativamente mayor, en contraste, con el 75% disminuyó, lo que se observó en todos los tepetates respecto al valor inicial (Cuadro 2). La adición de sedimentos acuícolas a suelos generalmente favorecerá el desarrollo de su estructura, la penetración de las raíces, la aireación, la retención y el movimiento del agua, lo que incrementará su productividad (Rahman *et al*., 2004).

Cuadro 2. Parámetros edáficos en tepetates con diferentes concentraciones de sedimento de origen acuícola.

Tepetate	Sedimento (%)	pH	Da (g cm-3)	CE (dS m-1)	MO (%)	N inorg (mg kg-1)	P (mg kg-1)	AM (mg C-CO_2 kg-1 suelo. día-1)
Ixtacuixtla	25	7.58a	0.93d	0.45ab	1.89ab	51.11a	1.74a	95.54a
	50	7.69ab	0.86bcd	0.59cd	1.73a	52.14a	1.78ab	124.47a
	75	7.65ab	0.83abc	0.79e	4.06b	52.80a	3.33c	191.36a
Metepec	25	7.71ab	0.90cd	0.39a	1.84ab	36.12a	1.19a	98.62a
	50	7.69ab	0.85bcd	0.54bc	1.95ab	36.98a	1.80ab	123.53a
	75	7.72ab	0.79ab	0.73de	3.44ab	37.21a	2.17abc	128.41a
Reyes	25	7.78b	0.83abc	0.65cd	2.37ab	55.16a	1.43a	136.83a
	50	7.77b	0.80ab	0.60cd	2.56ab	55.17a	1.94ab	181.85a
	75	7.72ab	0.75a	0.85e	3.81ab	56.22a	3.11bc	140.58a

Media Tukey con la misma letra por fila no es estadísticamente diferente ($p < 0.05$). AM=Actividad microbiana.

El pH fue estadísticamente significativo con 25 y 50% de sedimento en el tepetate del sitio Reyes, en comparación con el de Ixtacuixtla y Metepec, clasificándose como medianamente alcalino. La CE fue significativa en Reyes con el 75% de sedimento, sin problemas de salinidad. El contenido de la MO se clasificó como bajo (<4%) en todos los sitios, a excepción del porcentaje en el tepetate de Ixtacuixtla, el cual fue significativo y ligeramente superior. En cuanto al N inorg no existieron diferencias entre los diferentes tratamientos ($p>0.05$), pero al igual que la materia orgánica con el 75% de sedimento se tuvo un incremento en el valor de este nutrimento que de acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 (Semarnat, 2002) los valores son clasificados de medio (20-40 mg kg^{-1}) a alto (40-60 mg kg^{-1}). Con base en esta misma norma, respecto al P fue clasificado como bajo (< 5.5 mg kg^{-1}), pero con el 75% de sedimento se incrementó la concentración en el tepetate del sitio Ixtacuixtla. Rahman y Yakupitiyage (2006) reportaron que con 30 y 60% de sedimento de tilapia aplicado a suelos se obtuvo un incremento en el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio. Por lo que, el adicionar sedimento acuícola a tepetates puede representar una mejora en cuanto a su fertilidad.

Finalmente, en el tepetate del sitio Ixtacuixtla la actividad microbiana, determinada a través del CO_2, se incrementó, aunque sin diferencias significativas ($p > 0.05$) entre tratamientos. Al respecto, Celis *et al*. (2009) mencionan que a medida que existe un aumento en la concentración de sedimento de trucha se tuvo un incremento de la actividad microbiana, lo que sugiere una mayor disponibilidad de carbono y energía para los microorganismos del suelo, lo que favorece la actividad microbiana del tepetate.

CONCLUSIONES

Con una concentración a partir del 25% de sedimento a los 60 días se disminuye la densidad aparente en los tepetates y se incrementa el contenido de materia orgánica, N inorgánico, fósforo y la actividad microbiana. Aún con valores bajos de fertilidad con base en la normatividad mexicana, el empleo del sedimento acuícola es una opción prometedora para los trabajos de rehabilitación de suelos degradados.

BIBLIOGRAFÍA

Anderson, J. (1982). Soil Respiration. En: Page, A., Miller, R., Kenney D. (Eds). Methods of soil analysis. Part II. Chemical and microbiological properties. 2nd ed. American Society of Agronomy. Number 9. Madison, Wisconsin, USA. 831-871 pp.

Báez-Pérez, A., Etchevers-Barra, J. D., Hidalgo-Moreno, C., Prat, C., Ordaz-Chaparro, V. & Núñez-Escobar, R. (2002). C-Orgánico y P-Olsen en tepetates cultivados de México. *Agrociencia*, 36, 643-653.

Bolaños, G.M.A., Paz, P.F.C., Gaistardo, O.C., Argumedo, E.J.A., Romero, B.V.M. & de la Cruz, C.J.C. (2016). Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 271-288.

Burducea, M., Lobiuc, A., Dirvariu, L., Oprea, E., Olaru, S.M., Teliban, G., Stoleru, V., Poghirc, V., Cara, I.G. & Filip, M. (2022). Assessment of the fertilization capacity of the aquaculture sediment for wheat grass as sustainable alternative use. *Plants*, 11(5):634. https://doi.org/10.3390/plants11050634.

Calderón-Medina, C.L., Bautista-Mantilla, G.P. & Rojas-González, S. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. *Orinoquia*, 22(2), 141-157. https://doi.org/10.22579/20112629.524.

Celis, J., Sandoval, M. & Zagal, Z. (2009). Actividad respiratoria de microorganismos en un suelo patagónico enmendado con lodos salmonícolas. *Archives Medical Veterinarian*, 41, 275-279.

Flores-Román, David, Muñiz-Irigoyen, Carla Guadalupe, Galicia-Palacios, María del Socorro, Ferrera-Cerrato, Ronald, & Zenteno, Gerardo. (2011). Enmiendas orgánicas y durazno, *Prunus persica* (L.) Batsch, en el mejoramiento de una capa endurecida, tepetate tipo duripán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(3), 479-486.

García, G. E., Vázquez, C. O. G., & Galindo F. G. L. (2024). Rehabilitación ecológica en San Diego Metepec, Tlaxcala. Centro de Investigación en Genética y Ambiente. Universidad Autónoma de Tlaxcala. 57 p. https://cigya.uatx.mx

Gutiérrez-Pérez, N., García-Gallegos, E., Vázquez-Cuecuecha, O. G. & Hernández-Acosta, E. (2023). Hidrogeles de quitosano y poliacrilamida sobre las propiedades edáficas y el crecimiento de *Lupinus exaltatus*. En: Agrárias (libro electrónico): pesquisa e inovacao nas ciencias que alimentam o mundo X/ Organizador Eduardo Eugenio Spers. Curitiba, PR: Artemis. 1-10 p. https://doi.org/10.37572/EdArt_3011230551.

Dróżdż, D., Malińska, K. & Kacprzak, M. (2020). Potential of fishpond sediments composts as organic fertilizers. *Waste Biomass Valorization*, 11, 5151–5163. https://doi.org/10.1007/s12649-020-01074-6.

Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Báez, H., & Díaz-Ortega, J. (2007). Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1), 133-145.

Rahman, M.M. & Yakupitiyage, A. (2006). use of fishpond sediment for sustainable aquaculture–agriculture farming. *Sus. Dev. Plann*., 1, (2): 192–202.

Rahman, M. M., Yakupitiyage, A. & Ranamukhaarachchi, S. L. (2004). Agricultural use of fishpond sediment for environmental amelioration. *Thammasat Int. J. Sc. Tech.*, 9(4), 1-10.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2002). Norma oficial mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69255.pdf

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA EN EL DESARROLLO Y CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE CHILTEPÍN

José Manuel Gutiérrez Campos[1]; María Isabel Mendoza Raya[1]; Ángel Mena García[2]

[1] Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Colima. Autopista Colima-Manzanillo km 40, CP. 28930, Tecomán, Colima, México.
[2] Posgrado en Edafología, Colegio de Postgraduados campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, CP. 56264, Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Correo del autor de correspondencia: jgutierrez80@ucol.mx

RESUMEN

El primer eslabón para asegurar el éxito de un cultivo es la etapa de plántula. En el caso del chiltepín se conocen las técnicas para mejorar la germinación de la semilla, sin embargo, el manejo de plagas, enfermedades, riego y la nutrición de la especie ha sido poco estudiado. En este contexto, el objetivo de esta investigación fue evaluar tres conductividades eléctricas (CE) de la solución nutritiva Steiner en el desarrollo y crecimiento de plántulas de chile chiltepín. A partir de plántulas de 32 días de siembra (dds) se diseñó un experimento completamente al azar con tres tratamientos y cuatro réplicas cada uno. Los tratamientos consistieron en tres niveles de CE (0.0, 0.4 y 0.8 $dS \cdot m^{-1}$) generados por la solución nutritiva Steiner. Se evaluó la altura de plántula, el diámetro de tallo, el número de hojas, la biomasa aérea, de raíz y total. Los datos de las variables fueron sometidos a análisis de varianza y pruebas de comparación múltiple de medias (Tukey $P \leq 0.05$). Los resultados demostraron que la solución con mayor CE (0.8 $dS \cdot m^{-1}$) presentó la mayor altura de plántula y la biomasa seca de la raíz. En contraste, los valores más bajos en todas las variables evaluadas se observaron en la solución con menor CE (0.0 $dS \cdot m^{-1}$). Se concluyó que la solución nutritiva Steiner con CE de 0.8 $dS \cdot m^{-1}$ mejora el desarrollo y crecimiento de plántulas de chiltepín.

PALABRAS CLAVE: *Capsicum annuum var. glabriusculum; chile tepín; concentración nutrimental; estrés osmótico; solución Steiner.*

INTRODUCCIÓN

El chiltepín es un chile silvestre en vías de domesticación por su importancia sociocultural, ambiental y económica, pues solamente un kilogramo de fruto seco puede llegar a costar más de 1 900 pesos. Sin embargo, a pesar de su importancia, una de las problemáticas de la domesticación de este cultivo es que la producción de plántulas es compleja, puesto que la germinación de la semilla es baja y se desconoce el manejo de plagas, enfermedades, riego y nutrición para obtener plántulas de calidad (Gómez-Anduro *et al.,* 2024). Esta etapa representa en cualquier cultivo un importante eslabón para asegurar el éxito de la producción agrícola en hortalizas tropicales, pues si no se realiza correctamente, las plántulas no toleran el trasplante a campo y, en consecuencia, genera pérdidas económicas (Meneses-Lazo *et al.,* 2020).

Una nutrición adecuada ajustada a la etapa fenológica y la demanda nutrimental en la etapa de plántula de cada cultivo permite que exista un balance de nutrientes específicos lo que ayuda a que se realicen funciones metabólicas apropiadas que mejoran el vigor durante el desarrollo y crecimiento, que en esta última instancia facilita su establecimiento al trasplante (Steiner, 1984; Meneses-Lazo *et al.,* 2020).

En el caso del chiltepín, los estudios sobre el manejo de la nutrición en plántula son escasos. Por ejemplo, Villalón-Mendoza *et al. (2022) encontraron que con la aplicación de fertilizante Osmocote Plus (8.6 g L-1) en plántulas de piquín (C. annuum var. glabriusculum)* encontraron una altura de 8 cm, 9 hojas y 1.6 mm de diámetro de tallo, superior al control sin fertilizante (7.5 cm, 8 y 1.6 mm, respectivamente). En ese sentido, es sabido que entre los cultivares, ecotipos, variedades e híbridos de una misma especie existen diferencias en la tolerancia a la salinidad debido a su variabilidad genética (López-Aguilar *et al.,* 2012). En este contexto, el objetivo de esta investigación fue evaluar tres concentraciones de conductividad eléctrica de la solución nutritiva en el desarrollo y el crecimiento de plántulas de chile chiltepín.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental. El experimento se desarrolló del 23 de marzo al 06 de junio de 2024 en un invernadero tipo túnel con estructura metálica y malla blanca antiáfidos calibre 720 y posicionada subyacente una malla que proporcionaba 20% de sombreo, situado en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad de Colima (kilómetro 40 de la autopista Colima-Manzanillo, Colonia La Estación, Tecomán, Colima, C.P. 28930 y coordenadas geográficas de 18° 56´ 54.8´´ LN y 103° 53´ 52.5´´ LO).

Material vegetal. Semillas de chile chiltepín fueron seleccionadas por su apariencia deseable (color blanco o amarillo, y ausencia de necrosis) y sometidas a inmersión durante 24 h en una solución de 500 ppm de ácido giberélico diluida en agua destilada (AD). Transcurrido el proceso de inmersión, las semillas se sembraron a una profundidad de 0.5 cm en charolas de poliestireno expandido de 25 cavidades que contenían sustrato comercial BM2 (Berger®, mezcla de turba, perlita y vermiculita con pH= 5.5 previamente humedecido. Una vez sembradas, las charolas se colocaron dentro de una bolsa plástica negra durante dos días. El riego se realizó cada dos días con AD durante las primeras tres semanas o lo requerido para mantener la humedad necesaria hasta la germinación. Después de transcurrido este tiempo, el riego fue cada 24 h y se suministraron 5 mL d^{-1} por cada cavidad.

Diseño experimental. La investigación se estableció bajo un diseño completamente al azar con tres tratamientos y cuatro repeticiones. Los tratamientos consistieron en la CE (0.0, 0.4 y 0.8 $dS{\cdot}m^{-1}$) generada por la solución nutritiva Steiner (1984). Los tratamientos se aplicaron una vez que las plántulas desarrollaron las primeras dos hojas verdaderas (32 días después de la siembra [dds]), momento en el cual se quitó la malla sombra. Cada unidad experimental se conformó de una charola de 25 cavidades con una plántula cada una, mientras las unidades de muestreo fueron nueve plantas centrales de la charola.

Variables de respuesta. Estas se determinaron a los 72 dds (40 d después de aplicar solución nutritiva [ddasn]) se evaluó el diámetro del tallo (Dt) con un vernier digital (Trupper, México); la altura de la planta (Alt) con una cinta métrica y el número de hojas (Nh), la biomasa seca aérea (tallo y hoja [Bsa]), de la raíz (Bsr) y total (Bstot). Para la biomasa seca, las plantas se separaron en raíz, hoja y tallo, las cuales se lavaron con AD para eliminar contaminantes y polvo. Posteriormente, se colocaron en bolsas de papel estraza y se secaron en una estufa (Novatech) durante 72 h a 60 °C. A continuación, el material seco se pesó en una balanza analítica (Sartorius, MA 30).

Análisis estadístico. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (α=0.05) y las diferencias significativas entre tratamientos se determinaron mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey (HSD), utilizando el software R (versión 4.4.1, R Core Team, 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El efecto de la CE en la solución nutritiva sobre el desarrollo y crecimiento de plántulas de chiltepín se muestra en el Cuadro 1. Las plantas de chiltepín que se desarrollaron en la CE de 0.8 dS m^{-1} fueron de mayor altura y acumulación de biomasa seca de la raíz en comparación con las plántulas crecidas en 0.0 y 0.4 dS·m^{-1}. El diámetro de tallo, la biomasa seca aérea y total fueron superiores en las plantas con solución de 0.8 dS·m^{-1} que aquellas con solución de 0.0 dS·m^{-1}, pero ambos tuvieron una similar respuesta que con 0.4 dS·m^{-1}. Por último, el número de hojas fue más bajo en las plántulas irrigadas con una CE de 0.0 dS·m^{-1} con relación a las plántulas con solución de 0.4 y 0.8 dS·m^{-1}.

Cuadro 1. Efecto de la conductividad eléctrica (CE) en la solución nutritiva sobre el desarrollo y crecimiento de plántulas de chile chiltepín

.

CE (dS m^{-1})	Alt cm	Dt mm	Nh	Bsa	Bsr g	Bstot
0.0	9.40 c*	1.60 b	8.62 b	0.0679 b	0.0237 b	0.0916 b
0.4	14.40 b	1.84 ab	11.25 a	0.1168 ab	0.0424 b	0.1592 ab
0.8	18.76 a	2.13 a	12.56 a	0.1708 a	0.0624 a	0.2333 a
DMSH	3.29	0.36	1.6	0.0975	0.019	0.1096
Valor de P	<0.001	0.009	<0.001	0.047	0.001	0.017

*Medias con letra distinta en la misma columna son estadísticamente (Tukey, P ≤ 0.05). Alt= altura de plántula; Dt= diámetro de tallo; Nh= número de hojas; Bsa= biomasa seca aérea; Bsr= biomasa seca radical; Bstot= biomasa seca total; DMSH= diferencias mínimas significativas honestas.

Las investigaciones donde se describe la CE y la nutrición para el crecimiento de plántulas de chiltepín son escasas y nulas en aquellas donde se realizan comparaciones de niveles de fertilización. Por ejemplo, López-Aguilar *et al.* (2012) evaluaron a los 93 dds el crecimiento de plántulas de chiltepín irrigados con solución Hoagland's al 100% de su concentración junto con un aumento de salinidad (0-300 mmol NaCl). Las plántulas con la solución presentaron altura de 21 cm, 135 hojas y una longitud radical de 34 cm, 3.4 y 3 g de biomasa seca aérea y de raíz, respectivamente. Por otro lado, Vega-Armenta *et al.* (2025) durante un mes estudiaron el efecto de residuos sólidos composteados y utilizados

como sustrato, además, se compararon con la aplicación de agua destilada y la solución Murashige y Skoog en el crecimiento de plántulas de chiltepín. Los autores anteriores reportaron que las plantas con solución Murashige y Skoog un incremento de la altura de la plántula (6.9 cm) y la longitud de la raíz (6.2 cm) en comparación con las plantas irrigadas con agua destilada (5.3 y 4.1 cm, respectivamente) y con efecto similar en el diámetro del tallo, la biomasa seca aérea y de la raíz. Estos valores presentados por ambos autores son discrepantes de los nuestros por la diferencia en los momentos en la evaluación y los tratamientos utilizados.

Con relación al desarrollo y el crecimiento de las plántulas de chiltepín se observó que la mayor concentración de la solución nutritiva (0.8 $dS \cdot m^{-1}$) obtuvo los mejores valores en todas las variables evaluadas y la de concentración más baja, los menores. Similar tendencia encontró Villalón-Mendoza *et al.* (2022) al evaluar plántulas de piquín (*C. annuum* var. *glabriusculum)* con la aplicación de fertilizante Osmocote Plus (8.6 g L^{-1}, 15-9-12 de NPK) encontraron una altura de 8 cm, 9 hojas y 1.6 mm de diámetro de tallo, superior al control sin fertilizante (7.5 cm, 8 y 1.6 mm, respectivamente). Por otro lado, algunos autores contrastan que más que la CE de la solución nutritiva, el balance de los elementos que la conforman puede ser la diferencia en el crecimiento de las plántulas. Por ejemplo, en chile pimiento morrón, Meneses-Lazo *et al*. (2020) con soluciones ajustadas a 2.0 $dS \cdot m^{-1}$ encontraron mejor respuesta con la aplicación de la solución Steiner y Hoagland en variables de crecimiento como altura de planta, biomasa aérea de la hoja, de la raíz y total con relación a la solución nutritiva de Soria. En otro estudio en Chile serrano y con las soluciones ajustadas a 1 $dS \cdot m^{-1}$, Cabanzo-Atilano *et al*. (2020) observaron que las plántulas con solución nutritiva Steiner tenían mayor altura, diámetro de tallo, número de hojas y área foliar, mientras que presentaron menor longitud radical en comparación con la solución de té de vermicompost.

CONCLUSIONES

La solución nutritiva Steiner con una conductividad eléctrica de 0.8 dS m^{-1} mejora el desarrollo y crecimiento de plántulas de chiltepín.

BIBLIOGRAFÍA

Cabanzo-Atilano, I., Rodríguez-Mendoza, M. N., García-Cué, J. L., Almaraz-Suárez, J. J., & Gutiérrez-Castorena, M. D. C. (2020). La biofertilización y nutrición en el desarrollo de plántulas de chile serrano. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *11*(4), 699-712.

Gómez-Anduro G.A., Cázares E.P., Hernández J.A., López-Aguilar R.D., Melero-Astorga J.M., Briseño- Ruiz S.E. (2024). Bienestar social con cultivo de chiltepín: De la sabiduría ancestral a la investigación científica. Revista el sol de México. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. Av. Instituto Politécnico Nacional 195, Col. Playa Palo de Santa Rita Sur, 23096 La Paz, B.C.S., México. https://oem.com.mx/elsoldemexico/analisis/bienestar-social-con-cultivo-de-chiltepin-de-la-sabiduria-ancestral-a-la-investigacion-cientifica-13038955.

López-Aguilar, R., Medina-Hernández, D., Ascencio-Valle, F., Nieto-Garibay, A., Arce-Montoya, M., Larrinaga-Mayoral, J. A., & Gómez-Anduro, G. A. (2012). Differential responses of Chiltepin (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) and Poblano (*Capsicum annuum* var. *annuum*) hot peppers to salinity at the plantlet stage. *African Journal of Biotechnology*, *11*(11), 2642.

Meneses-Lazo, R., Garruña, R., Echevarría-Machado, I., Alvarado-López, C., Villanueva-Couoh, E., García-Maldonado, J. Q., & Cristóbal-Alejo, J. (2020). Growth, chlorophyll fluorescence and gas exchange of pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) plants in response to uptake and partitioning of nutrients. *Chilean journal of agricultural research*, *80*(4), 585-597.

R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.4.1) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/.

Steiner, A.A. (1984). The universal nutrient solution. In 6. International Congress on Soilless Culture, Lunteren (Netherlands), 29 Apr-5 May 1984. ISOSC.

Vega-Armenta, R. M., Ruelas-Ayala, R. D., Sañudo-Torres, R. R., & Félix-Herrán, J. A. (2025). Compostaje de residuos sólidos orgánicos y su efecto en especies forestales de importancia económica en el norte de Sinaloa. *Revista internacional de contaminación ambiental*, *41*, 65-75. https://doi.org/10.20937/RICA.55125.

Villalón-Mendoza, H., Malacara-Ramírez, R.I., Garza-Ocañas, F., Garza-López, E., Olivo, A.M., Avalos, J.G.M., & Ramírez-Meráz, M. (2022) Testing Organic Fertilizers to Improve Seedlings Quality of Wild "Piquin" Chilli Pepper (*Capsicum annuum* L. var. *glabriusculum*) from Northeastern Mexico. *Open Access Library Journal*, *9*, e8565. https://doi.org/10.4236/oalib.1108565.

CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE PAPAYA EN TRES SUSTRATOS ORGÁNICOS

Alexis Salvador Rodríguez Carillo[1]; Adán Zúñiga Jr[1]; Cesar Antonio Casasola Elizondo[2]; José Manuel Gutiérrez Campos[1]

[1] Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Colima. Autopista Colima-Manzanillo km 40, CP. 28930, Tecomán, Colima, México.
[2] Campo Experimental Chetumal CIRSE-INIFAP. Carretera Chetumal - Bacalar km 25, CP. 77000, Othón P. Blanco, Quintana Roo, México.

Correo del autor de correspondencia: jgutierrez80@ucol.mx

RESUMEN

En México, la papaya se trasplanta en 19 613 hectáreas con densidades que varían de 1 600 a 1 800 plantas ha^{-1}. Para asegurar la producción hermafrodita del fruto, se trasplanta hasta cuatro veces la cantidad deseada. Sin embargo, para producir plántulas en semilleros se utiliza turba; la extracción de este sustrato causa complicaciones ambientales. Por lo tanto, el objetivo fue evaluar los sustratos orgánicos y las soluciones nutritivas en el crecimiento de plántulas de papaya. El experimento se realizó mediante un diseño completamente aleatorizado con tres sustratos (polvo de coco [PC], mezcla de polvo de coco:vermicompost [mezcla PC:V] y turba [BM2]). Se utilizaron semillas de papaya híbrida Intenzza y se determinó el efecto de los sustratos en variables de emergencia, altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas y longitud radical. Los resultados mostraron que la turba y el polvillo de coco presentaron efectos similares en las variables evaluadas, no así, en la mezcla PC:V, el cual fue menor a la turba en la emergencia y la longitud radical. En conclusión, el polvo de coco puede ser un sustrato alternativo a la turba para la producción de plántulas de papaya.

PALABRAS CLAVE: *Emergencia; semillero; sustratos alternativos a la turba.*

INTRODUCCIÓN

La papaya (*Carica papaya* L.) es una planta tropical originaria de Centro América cuya fruta, en los últimos años, ha tomado gran importancia para consumo en fresco en todo el mundo. En 2023, el estado de Colima se posicionó como el segundo productor de papayas más importante del país con una participación en la producción nacional de 17.84%, solo detrás de Oaxaca (27.71%) (SIAP, 2024).

Para alcanzar dicha producción en Colima se establecen 3 705.65 ha con densidad promedio de 1 600 a 1 800 plantas ha^{-1}, sin embargo, es necesario cuadruplicar la cantidad de plántula a establecer debido a que es deseable asegurar plantas con floración hermafroditas para la comercialización del fruto (Sánchez-Betancourt y Núñez-Zarate, 2008), pues ésta una de las principales fases clave para la explotación económica de la especie (Cardoso *et al.*, 2021).

A la fecha, para la producción de plántula de papaya es utilizada la turba como sustrato, pues tiene características que lo categorizan como el ideal por su capacidad de absorción y mantener el contenido de humedad, elevada capacidad de intercambio

catiónico, materia orgánica y porosidad (Arévalo *et al*., 2016), sin embargo, la turba obtenida del musgo *Sphagnum* sp. es extraída de los depósitos de Canadá y Europa, que infligen efectos adversos medioambientales al considerarse reservorios de CO_2, clave importante para el combate al cambio climático. Como respuesta a esta situación se intenta utilizar sustratos alternativos (Lourenço *et al*., 2023).

Como alternativas, la utilización de sustratos orgánicos cuyo origen proviene de desechos industriales o derivados de las actividades antropogénicas tienen varias ventajas, pues su manejo eficiente mejora la gestión adecuada de residuos orgánicos que generan gases de efecto invernadero (CO_2, N_2O y CH_4) que representan daños para la salud humana y el medio ambiente (Koul *et al*., 2022). Por ejemplo, en el caso del consumo de la fruta de coco, el 85% del peso corresponde a residuo (Lima y Silva, 2020).

Lo anterior pone en evidencia la urgencia de un destino apropiado para los residuos producidos que puedan reciclarse y utilizarse en la misma agricultura. Es por ello que, Lima y Silva (2020) incorporaron 10% de polvillo o fibra de coco al sustrato para la generación de plantas de *Libidibia ferrea* y *Cenostigma pyramidale* y encontraron incrementos de 1.5 a 3 veces en la germinación en comparación con la turba, mientras que, Naumi *et al.* (2024) al evaluar proporciones de suelo:vermicompost como sustrato en plántulas de papaya a los 60 dds encontraron que la relación 40:60 obtuvo mejor crecimiento en la longitud radical (32.75 cm), altura (22.5 cm), diámetro del tallo (2.06 mm) y número de hojas (14.69). Utilizar residuos orgánicos locales permite una gestión adecuada y podrían ser una alternativa para el uso de la turba en la producción de plántulas de papaya, por lo tanto, el objetivo fue evaluar tres sustratos orgánicos sobre el crecimiento de plántulas de papaya.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental. El experimento se llevó a cabo en un invernadero con ventilación cenital tipo túnel, paredes con malla antiáfidos 40x40, estructura galvanizada, cubierta superior de polietileno UVII-720 y ground cover blanco. Este se encuentra en la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad de Colima ubicado en el km 40 de la Autopista Colima-Manzanillo, Tecomán, Colima, México, geográficamente se sitúa en la Latitud Norte 18° 56’ 54.8” y Latitud Oeste 103° 53’ 52.5” con altitud de 40 metros sobre el nivel del mar.

Material vegetal. Semillas de papaya híbrida Intenzza fueron utilizadas en la experimentación, cuyo material se recomienda a densidades de 1 785 plantas por hectárea, con potencial productivo de 90-120 toneladas por hectárea en ciclo de periodos cortos de cosecha (6 meses). El híbrido Intenzza mantiene una proporción de sexos de 50% hermafroditas y 50% femeninas. El fruto tiene un peso promedio entre 1.2 y 2.2 kg y en cuanto a sólidos solubles totales puede llegar hasta 14°Brix y el fruto es tipo Formosa (Semillas del Caribe, 2024).

Diseño experimental. El experimento se condujo diseño experimental completamente al azar con tres tratamientos: T1=Turba marca Berger® (BM2, mezcla de turba de grano fino, perlita y vermiculita), T2= polvillo de coco (PC) marca Germinaza® y T3=vermicompost obtenida a partir de estiércol de cabra y transformada a partir la

defecación de lombriz roja californiana y mezcla de polvillo de coco (70%)-Vermicompost (30%) (mezcla PC:V). La unidad experimental consistió en 1/6 de charola de poliestireno de 200 cavidades con sustrato y una semilla de papaya por cavidad. Las unidades de muestreo fueron 9 plántulas que se encontraban en la parte central de la unidad experimental.

Variables de respuesta. La emergencia se registró por conteo a los 16 días después de la siembra (dds); las demás se determinaron a los 56 dds y fueron: altura de plántula (cm) se midió desde el cuello del tallo hasta el ápice de crecimiento con apoyo de flexómetro (Lufkin); diámetro de tallo (mm) tomado por debajo de los cotiledones con vernier digital (Truper), número de hojas por conteo y longitud radical (cm) registrado desde el cuello del tallo hacia el ápice radical con ayuda de un flexómetro.

Análisis estadístico. Los datos obtenidos de las variables se sometieron a pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianza (Levene) para verificar los supuestos del diseño para su posterior análisis de varianza (α=0.05) y prueba de comparación de medias por Tukey mediante el programa R (versión 4.4.1, R Core Team, 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La emergencia de las semillas de papaya a los 16 dds presentó diferencias entre la mezcla de PC:V y la turba, siendo las anteriores similares estadísticamente al polvillo de coco. Por otra parte, los efectos sobre la altura de planta, el diámetro de tallo y el número de hojas fueron similares en estadísticas entre las plantas crecidas en los diferentes sustratos. Con relación a la longitud radical, las plántulas que se desarrollaron sobre la turba fueron superiores a aquellas con la mezcla de polvillo de coco más vermicompost; sin embargo, ambas fueron estadísticamente similares al polvillo de coco.

Cuadro 1. Efecto del sustrato orgánico en el crecimiento de plántulas de papaya a los 56 días después de la siembra.

Tratamiento	EM %	AP cm	DT mm	NH	LR cm
Turba	89.99 a	13.5	3.41	7.09	8.56 a
PC	87.21 ab	11.04	2.79	7.05	8.24 ab
Mezcla PC:V	73.32 b	13.67	3.33	6.79	6.08 b
Valor de P	0.013	3.47	0.68	0.61	2.22

Medias con letra distinta en la misma columna son estadísticamente diferente según prueba estadística Tukey (P= < 0.05). PC= polvillo de coco; Mezcla PC:V= polvillo de coco (70%):vermicompost (30%).

Nuestros hallazgos sugieren que el polvillo de coco puede ser utilizado como una alternativa a la utilización de turba de BM2 para la producción de plántulas de papaya, pues registra parámetros similares en el crecimiento. Una particularidad para la elección del sustrato es que facilite las condiciones para la germinación y emergencia de las semillas.

En este estudio se obtuvo emergencia baja en la mezcla PC:V pero aceptable para la turba y PC, estos últimos valores fueron similares a lo encontrado por Ortega *et al.* (2010),

quienes al utilizar turba y vermicompost reportan 90% de emergencia en plántulas de tomate a los 15 dds. Estos mismos autores indican que la capacidad de retención de humedad del sustrato está relacionada con el nivel de hidratación de la endotesta y la dilución de los residuos fenólicos que inhiben la germinación o el incremento de la actividad bioquímica que son responsables de romper el letargo del embrión.

Con relación al crecimiento, valores superiores en la altura (22 cm), diámetro de tallo (6.5 mm), número de hojas (10) y longitud radical (24 cm) encontró Cardoso et al., 2021 en plántulas de papaya var Sunrise Solo crecidas en sustrato de cáscara de coco verde a los 42 dds. Por otro lado, Sandoval *et al.* (2025) encontraron valores menores contrastantes que esta investigación, pues en su evaluación a los 70 dds en plántulas de papaya cv. Taiwan la turba fue superior en el número de hojas (6.2), diámetro de tallo (3.53 mm) y altura (4.26 cm) con relación al polvillo de coco (2.2, 1.12 mm y 3.12 mm, respectivamente).

Las diferencias en el comportamiento de la papaya con relación al sustrato pueden ir desde la respuesta genética de la planta (variedades, cultivares e híbridos) y su interacción con el ambiente, hasta el origen de obtención y manejo previo del insumo como sustrato. Por ejemplo, el autor anterior no indicó si realizó un lavado de sales al polvillo de coco, proceso previo que recomienda Gayosso *et al.* (2016) para eliminar las sales existentes y evitar toxicidad en las plántulas.

CONCLUSIONES

Al mostrar efectos similares en el crecimiento, el polvo de coco puede ser un sustrato alternativo a la turba para la producción de plántulas de papaya.

BIBLIOGRAFÍA

Arévalo, M., Oberpaur, C. & C. Méndez. (2016). Inclusión de musgo (*Sphagnum magellanicum* Brid.) y fibra de coco como componentes orgánicos del sustrato para almácigos de kiwi (*Actinidia deliciosa*). *IDESIA, 34*(2): 47-55.

Cardoso, S.F.E., Natale, W., de Melo B.M., Oliveira M.R. & C.R. Santiago. (2021). Growth and accumulation of nutrients in papaya tree seedlings grown on organic substrates. *Revista Ceres, 68*(4): 267-275

Gayosso, R.S., Borges, G.L., Villanueva, C.E., Estrada, B.M. & Garruña, R. (2016). Conductividad eléctrica y sales en lavados de fibra de coco y sargazo. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria México, 4*(1): 18-24.

Koul, B., Yakoob, M. & Shah, M.P. (2022). Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environmental Research, 206:* 112285. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285

Lima, D.F. & Silva, M. (2020). Coconut powder and fiber as substrate components for the production seedlings of caatinga species. *Scientia Plena, 16*(10). https://doi.org/10.14808/sci.plena.2020.100203

Lourenço, M., Fitchett, J. M. & S. Woodborne. (2023). Peat definitions: A critical review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 47*(4): 506-520.

Ortega, L.D., Sánchez, J., Díaz, R. & Ocampo, J. (2010). Efecto de diferentes sustratos en el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill). *Ra Ximhai, 6*(3): 365-372.

R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.4.1) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Sánchez-Betancourt, E. & Núñez-Zarate, V. (2008). Evaluación de marcadores moleculares tipo SCAR para determinar el sexo en plantas de papaya (*Carica papaya* L.). *Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 9*(2): 31-36.

Sandoval, M.V., Pereira, A., Sarmento, A., Resendes, A., de Oliveira, E.M. & Rocha, R.D. (2025). Substratos orgânicos na emergência e desenvolvimento inicial de plântulas de mamoeiro cv. Taiwan. *Revista DELOS*, *18*(65): e4321-e4321.

Semillas del Caribe. (2024). "*Intenzza*". Semillas del Caribe. Acceso en Julio 15, 2024. https://www.semillasdelcaribe.com.mx/producto/intenzza/

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2024. "*Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*." Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Acceso en Julio 15, 2024

Naumi, S. A., Wijaya, W. & Wahyuni, S. (2024). The effect of the proportion of vermicompost fertilizer in planting media on the growth of papaya (Carica papaya L.) calina cultivar. *Jurnal Agrosci*, *1*(3).

CRECIMIENTO DE TORNACHILE CULTIVADO EN TRES POTENCIALES OSMÓTICOS

María Gabriela Ramírez Valadez[1]; Manuel Sandoval Villa[1]; Juan José Almaraz Suárez[1]; María Guadalupe Peralta Sánchez[1]; Erika Nava Reyna[2]

[1] Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados, Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56230.
[2] INIFAP CENID RASPA, Km. 6.5 margen derecha, Canal de Sacramento, Gómez Palacio, Durango, C.P. 35079.

Correo del autor de correspondencia: ramirez.gabriela@colpos.mx

RESUMEN

El chile es una especie vegetal con gran diversidad genética en México, dentro de esta se encuentra el tornachile, una variedad de chile nativa de Durango y Zacatecas. Con la nutrición pueden modificarse las características morfológicas y el crecimiento de las plantas. Para conocer estas modificaciones se realizó la presente investigación, en la cual se llevó a cabo un análisis de crecimiento de plantas de tornachile (*Capsicum annuum* L.) con tres niveles de nutrición. La investigación se llevó a cabo de mayo a octubre de 2024, en hidroponía e invernadero en donde se evaluaron tres potenciales osmóticos (PO) de la solución nutritiva Steiner (-0.072, -0.054 y -0.036 MPa). Se utilizó un diseño experimental completamente al azar, con 4 repeticiones. Se realizaron muestreos destructivos cada 14 días a partir de los 29 días después del trasplante (ddt), en los que se cuantificó el peso seco y el área foliar, con los cuales se determinaron los índices fisiológicos y morfológicos. La tasa de crecimiento relativo (TCR) y la tasa de asimilación neta (TAN) tuvieron valores descendentes a lo largo del ciclo, contrario a la tasa de crecimiento absoluto (TCA) y el índice de área foliar (IAF) que mostraron valores crecientes. Los valores máximos de TCR y TAN se presentaron en el intervalo de 50 a 71 ddt, los de TCA entre 92 a 113 ddt y el IAF en el rango de 113 a 134 ddt, sin diferencia estadística significativa entre tratamientos utilizando la prueba de Tukey ($P > 0.05$).

PALABRAS CLAVE: *Tasa de crecimiento relativo; tasa de crecimiento absoluto; tasa de asimilación neta; Índice de área foliar.*

INTRODUCCIÓN

México es considerado centro de origen y domesticación de chile (*Capsicum annuum* L.), en el cual se encuentra una gran diversidad genética, con gran variedad de formas, colores y tamaños (Aguilar-Rincón *et al*., 2010). Entre ellos se encuentra el tornachile, un tipo de chile endémico del estado de Durango. Uno de los factores fundamentales que permite mejorar la producción y calidad de los cultivos es su manejo nutrimental, el cual debe ser acorde a cada especie y condición de crecimiento (FAO, 2002). Con la nutrición pueden modificarse las características morfológicas y el crecimiento de las plantas (Villegas-Torres *et al*., 2005). El desarrollo de nuevas tecnologías e innovaciones como los sistemas hidropónicos es necesario para el incremento de la producción. Una propiedad

fisicoquímica inherente a las soluciones nutritivas utilizadas en la hidroponía es el potencial osmótico (PO), el cual depende de la cantidad de solutos disueltos (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2011). El incremento de la concentración absoluta de los nutrimentos en la solución disminuye el PO de la misma, ocasionando una menor absorción de agua y nutrimentos por la planta. Por el contrario, si se aplica una cantidad menor de nutrimentos en la solución que los requeridos por la planta, pueden inducirse deficiencias nutrimentales (Ben-Gal *et al*., 2009). En algunas variedades de *C. annuum* se han probado diferentes PO; sin embargo, no hay información disponible para el tornachile. Por lo que el objetivo de este estudio fue determinar el efecto del PO en el crecimiento del cultivo de tornachile.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, en condiciones de invernadero en un sistema hidropónico abierto. Se sembraron semillas de tornachile colectadas en el municipio de Nombre de Dios, Durango, en charolas de poliestireno de 200 cavidades, con turba y agrolita como sustrato, en proporción 3:1 v/v respectivamente.

El trasplante se realizó 55 días después de la siembra en macetas con tezontle rojo de 12 L. La fuente de nutrimentos del sistema hidropónico fue la solución nutritiva de Steiner (1984) y se evaluó el efecto de tres potenciales osmóticos (Cuadro 1). La concentración de micronutrimentos en cada solución nutritiva fue: Fe 0.6, Mn 0.3, Zn 0.08, Cu 0.06, Mo 0.05 y B 0.9 mg L^{-1}. El pH de las soluciones se mantuvo en 5.5.

Cuadro 4. Concentración de nutrimentos en las soluciones nutritivas empleadas como tratamientos para determinar la extracción de macronutrimentos en plantas de tornachile.

Ψ_s	NO_3^-	$H_2PO_4^-$	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+
(MPa)	**mmol(c) m^{-3}**					
-0.036	6.00	0.50	3.50	4.50	2.00	3.50
-0.054	9.00	0.75	5.25	6.75	3.00	5.25
-0.072	12.00	1.00	7.00	9.00	4.00	7.00

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental consistió en una maceta con una planta. Se realizaron muestreos destructivos a los 27, 50, 71, 92, 113 y 134 días después del trasplante (ddt). En cada muestreo se cuantificó el peso seco, mediante secado en estufa a 72 °C por 72 h, y el área foliar se midió con el programa ImageJ. Con los datos de área foliar y peso seco se calcularon las variables de fisiológicas TCR, TAN y TCA y la variable morfológica IAF, las cuales se calcularon utilizando las siguientes fórmulas:

$$TCR = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1} \qquad TCA = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \quad TAN = \frac{W_2 - W_1}{AF * (t_2 - t_1)} \quad IAF = \frac{AFT}{AS}$$

Donde: W1 = peso seco en el tiempo 1; W2 = peso seco en el tiempo 2; AF = área foliar promedio entre t1 y t2; AFT = área foliar total; AS = área del suelo; t2 – t1 = intervalo de tiempo (días).

Para el análisis de datos se realizaron análisis de varianza y comparación de medias de Tukey y se empleó el programa estadístico R versión 4.4.1.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los tres PO la TCR máxima se alcanzó de 27 a 50 ddt, que corresponde al crecimiento vegetativo inicial del tornachile, el tejido presente fotosintetiza y produce asimilados para generar nuevo crecimiento vegetativo. La TCR fue superior a 0.115 g g^{-1} $día^{-1}$ en todos los tratamientos, resultados similares encontraron Azofeira y Moreira (2004) en plantas de chile jalapeño, en donde la mayor TCR (0.167 g g^{-1} $día^{-1}$) se registró a los 40 ddt. El valor de la TCR disminuyó cerca de 50 % en el rango de 51 y 71 ddt. A los 92 ddt cuando la planta de tornachile está en floración y llena de frutos la TCR decreció nuevamente hasta llegar a 0.0267, 0.0235 y 0.0198 g g^{-1} $día^{-1}$ en los PO -0.054, -0.036 y -0.072 MPa respectivamente. En el periodo de 92 a 113 ddt, se registró un incremento en la TCR, lo que indica el inicio de un segundo ciclo de crecimiento vegetativo. Después de 113 ddt, la TCR descendió hasta un mínimo de 0.01668, 0.01819 y 0.01702 g g^{-1} $día^{-1}$ en los PO -0.072, -0.054 y -0.036 MPa a los 134 ddt (Figura 1A). A lo largo del ciclo de cultivo del tornachile, el PO no influyó en la TCR. Sin embargo, en un estudio conducido por Villa-Castorena *et al*. (2003) en chile 'Sandia' la TCR disminuyó 28 % en el PO -0.198 MPa con respecto al PO -0.0468 MPa, lo que sugiere que la fertilización excesiva reduce el tamaño de las plantas, al someterlas a estrés salino.

La tasa de asimilación neta (TAN) tuvo un comportamiento similar a la TCR. La TAN mostró diferencia estadística significativa ($P > 0.05$) solo a los 50 ddt, en donde el PO -0.036 MPa fue superior. La TAN más alta se registró entre los 27 y 71 ddt con valores superiores a 0.00850 g^{-1} cm^{-2} $día^{-1}$ en los tres PO. En dicho periodo se llevó a cabo el crecimiento vegetativo inicial de las plantas de tornachile, en las cuales se tiene mayor tejido fotosintético. Entre los 71 y 92 ddt la TAN se redujo hasta 0.000336, 0.000295 y 0.000249 g^{-1} cm^{-2} $día^{-1}$ en los PO -0.054, -0.072 y -0.036 MPa. Esto se debe al incremento en la producción de tejido no fotosintético como flores y frutos. Al igual que en la TCR entre 92 y 113 ddt se incrementó la TAN al presentarse el segundo ciclo de crecimiento y disminuyó a su nivel más bajo al término del ciclo del cultivo (Figura 1B). Dichos valores coinciden con los reportados por Villa-Castorena *et al*. (2003) en el PO de -0.0468 MPa y difieren de los obtenidos por Azofeira y Moreira (2004) donde la TAN máxima fue de 0.0008 g^{-1} cm^{-2} $día^{-1}$, es decir, 80 veces más baja que la TAN máxima obtenida en tornachile. Por su parte, Abdelaziz *et al*. (2008) reportaron 0.000406 g^{-1} cm^{-2} $día^{-1}$ de TAN máxima en la etapa vegetativa y 0.000224 g^{-1} cm^{-2} $día^{-1}$ en la etapa generativa en chile pimiento.

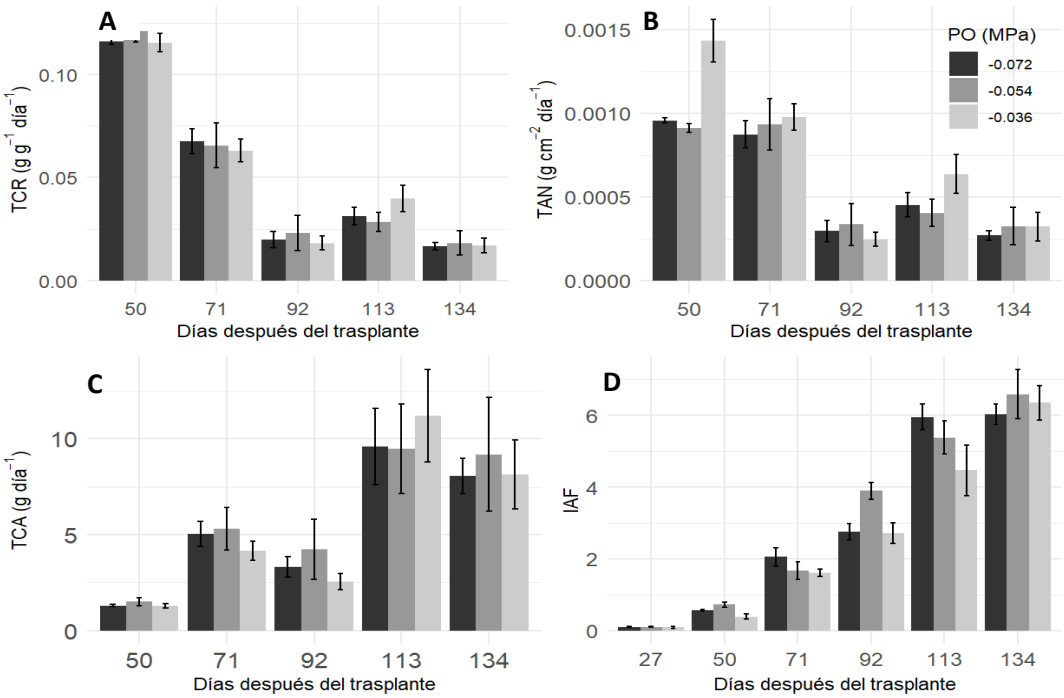


Figura 3. índices morfológicos y fisiológicos en plantas de tornachile cultivadas en tres potenciales osmóticos.

La tasa de crecimiento absoluto (TCA) aumentó a lo largo del ciclo del cultivo, la máxima producción de biomasa (más de 8 g día^{-1}) se obtuvo entre 92 y 134 ddt, cuando las plantas presentaron la segunda fase de crecimiento y al mismo tiempo ocurría el llenado de frutos sin diferencia estadística significativa ($P > 0.05$). A lo largo del ciclo de cultivo del tornachile, la TCA fue superior en los PO -0.036 y -0.054 MPa (Figura 1C). Resultados contrastantes encontraron Martínez-Andrade *et al.* (2023) en chile poblano, al observar la TCA máxima (6.74 g día^{-1}) en el mayor PO (-0.090 MPa), mientras que en el PO -0.036 MPa, se obtuvo una TCA máxima, inferior a 4 g día^{-1}.

El IAF de las plantas de tornachile mostró una tendencia creciente desde el inicio del ciclo hasta los 134 ddt en los tres PO y sin diferencia estadística significativa ($P < 0.05$). Durante los primeros 27 a 71 ddt los incrementos fueron menores que 1. Mientras que de 92 ddt a 113 se observó el mayor IAF y al finalizar el ciclo de cultivo se tuvo IAF mayor que 6 (Figura 1D). Sin embargo, el IAF obtenido en este estudio (6) es superior al IAF máximo encontrado en chile poblano por Mendoza-Pérez *et al.* (2017) de 2.78 y al IAF de 0.6 en chile jalapeño por Azofeira y Moreira (2004). La disminución del IAF al finalizar el ciclo del cultivo está relacionada con el sombreo de las hojas superiores sobre las inferiores.

CONCLUSIÓN

El PO no influye en las variables de crecimiento del tornachile, por lo que, en un programa de fertilización, un PO de -0.036 MPa es suficiente para cubrir la demanda nutrimental del cultivo. Al aplicar mayor cantidad de fertilizantes, es decir, un PO más

alto, el crecimiento sería el mismo. Sin embargo, el costo de producción y el impacto ambiental se incrementarán.

BIBLIOGRAFÍA

Abdelaziz, M. E., Hannfy-Ahmed, A. H., Bekhit, R. S. & Pokluda, R. (2008). Response of growth patterns in sweet pepper to diff erent NPK levels. *Acta universitatis agriculturae et silviculturae Mendelianae Brunensis, 66*(1), 241–244.

Azofeira, A. & Moreira, M.A. (2004). Análisis de crecimiento del chile jalapeño (Capsicum annuum L. cv. hot), en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Costarricensen 28*(1), 57-67.

Aguilar-Rincón, V. H., Corona-Torres, T., López-López, P., Latournerie-Moreno, L., Ramírez-Meraz, M., Villalón-Mendoza, H. & Aguilar-Castillo, J.A. (2010). Los chiles de México y su distribución. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, IT Conkal, UANL, UAN. Texcoco, estado de México, México. 114 p.

Ben-Gal, A., Borochov-Neori, H., Yermiyahu, U. & Shani. U. (2009). Is osmotic potential a more appropriate property than electrical conductivity for evaluating whole-plant response to salinity?. *Environmental and Experimental Botany. 65*(2), 232-237. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2008.09.006.

FAO-IFA, Food and Agriculture Organization and International Fertilizer Association 2002. Los fertilizantes y su uso. Disponible en: https://www.fao.org/3/x4781s/x4781s.pdf (mayo 2023).

Martínez-Andrade, N., Castro-Brindis, R., Pérez-Grajales, M. & Rodríguez-Pérez, J.E. (2023). Análisis de crecimiento y dinámica nutrimental de chile poblano (Capsicum annuum L. var. grossum Sendt), bajo invernadero. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7*(1), 1950-1971.

Mendoza-Pérez, C., Ramírez-Ayala, C., Ojeda-Bustamante, W. & Flores-Magdaleno, H. (2017). Estimation of leaf area index and yield of greenhouse-grown poblano pepper. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, *9*(1), 37-50.

Trejo-Téllez, L.I. & Gómez-Merino, F.C. (2012). Nutrient solutions for hydroponic systems. *In*: Asao T (ed) Hydroponics-A Standard methodology for plant biological researches. InTech, Rijeka, pp 1–23.

R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing* (Versión 4.4.1) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. https://www.r-project.org/.

Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. pp. 633-650. *In*: Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture. Wageningen. The Netherlands.

Villa-Castorena, M., Ulery, A. L., Catalán-Valencia, E. A. & Remmenga, M. D. (2003). Salinity and nitrogen rate effects on the growth and yield of chile pepper plants. *Soil Science Society of America Journal*, *67*(6), 1781-1789. https://doi.org/10.2136/sssaj2003.1781

Villegas-Torres, O.G., Sánchez-García, P., Baca-Castillo, G.A., Rodríguez-Mendoza, M.N., Trejo, C., Sandoval-Villa, M. & Cárdenas-Soriano, E. (2005). Crecimiento y estado nutrimental de plántulas de tomate en soluciones nutritivas con diferente concentración de calcio y potencial osmótico. *Terra Latinoamericana, 23*(1), 49-56.

DINÁMICA DE NITRATOS EN EL PECÍOLO DE CHILTEPÍN BAJO POTENCIALES OSMÓTICOS DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA

Autores: Adán Zúñiga Jr.[1]; Miguel Angel Barreto Torres[1], Azareel Angulo Castro[2]; Herminia Alejandra Hernández Ortega[1]; Juan Carlos Sánchez Rangel[1]; Santos Carballar Hernández[3]; José Oscar Armenta Ayala[2]; José Manuel Gutiérrez Campos[1,2]

[1] Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Colima. Autopista Colima-Manzanillo km 40, CP. 28930, Tecomán, Colima, México.

[2] Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa. Carretera Culiacán-El Dorado km 17.5, C.P. 80000, Culiacán de Rosales, Sinaloa, México.

[3] Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo. Av. Universidad Sur 3000, C.P. 59103, Sahuayo de Morelos, Michoacán de Ocampo, México.

Correo del autor de correspondencia: jgutierrez80@ucol.mx

RESUMEN

El chiltepín es una planta silvestre en proceso de domesticación de lacual se sabe poco sobre su nutrición, en particular del nitrógeno (N). El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto del potencial osmótico de la solución nutritiva Steiner sobre la concentración de nitrato en el extracto celular de pecíolo en chiltepín hasta los 78 días después del trasplante (ddt). Se utilizaron plántulas de chiltepín trasplantadas en sustrato de arena, distribuidas bajo un diseño completamente al azar con cuatro niveles de potencial osmótico (MPa) en la solución nutritiva Steiner: T1) -0.036, T2) -0.054, T3) -0.072 y T4) -0.090 MPa, y se determinó la concentración de nitrato en el extracto celular de pecíolo (ECP) a los 50, 64 y 78 ddt. A los 50 y 64 ddt no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, con concentraciones de nitrato (NO_3^{-1}) entre 4 500-7 600 ppm. A los 78 ddt, los potenciales -0.054, -0.072 y -0.090 MPa presentaron rangos de 4 475-4 625 ppm de NO_3^{-1}, valores superiores al obtenido con el potencial de -0.036 MPa (2 775 ppm de NO_3^{-1}). Mantener un potencial osmótico de -0.036 MPa hasta los 78 ddt reduce significativamente la concentración de nitrato en el extracto celular del pecíolo de chiltepín.

PALABRAS CLAVE: *Análisis de savia; Capsicum annuum var. Glabriusculum; concentración nutrimental; estrés osmótico; extracto celular de pecíolo.*

INTRODUCCIÓN

El chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) es una variedad silvestre de chile cuyo consumo ha aumentado notablemente en años recientes, en particular por su uso en platillos de mariscos. No obstante, existe escasa información sobre sus requerimientos nutricionales, ya que actualmente se considera como especie en proceso de domesticación (Araiza-Lizarde *et al*., 2011). El nitrógeno es uno de los nutrientes más importantes en la nutrición vegetal, componente estructural clave de moléculas como la clorofila, ADN,

aminoácidos, proteínas, entre otros compuestos fundamentales para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Navarro y Navarro, 2013).

La determinación del estado nutrimental del cultivo y mantener niveles óptimos de nutrientes son fundamentales para garantizar un crecimiento y rendimiento adecuados. Para el caso específico de N, su monitoreo puede realizarse mediante: 1) la cuantificación de N foliar (expresado en porcentaje) y 2) la medición de nitrato (NO_3^{-1}) en el ECP (expresado en ppm). Este último método presenta la ventaja de permitir una determinación *in situ*, a diferencia de los análisis convencionales que requieren procesos laboriosos como la digestión de muestras y el uso de equipos de laboratorio costosos (Rodríguez *et al.,* 2023). Si bien se han establecido los niveles de NO_3^{-1} en el ECP para diversas especies vegetales, actualmente no hay registros documentados para chiltepín (Padilla *et al.,* 2017*;* Rodríguez *et al.,* 2021). Por lo que, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes potenciales osmóticos en la solución nutritiva Steiner sobre la concentración de nitrato en el extracto celular de pecíolo en chiltepín hasta los 78 días después del trasplante.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental. El experimento se desarrolló del 10 de enero al 28 de marzo de 2025 en condiciones de campo abierto, en las parcelas experimentales de la Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad de Colima. El sitio de estudio se localiza en el kilómetro 40 de la autopista Colima-Manzanillo, Colonia La Estación, Tecomán, Colima (C.P. 28930), con coordenadas geográficas de 18° 56´ 54.8´´ LN y 103° 53´ 52.5´´ LO.

Material vegetal. Se emplearon 5 g de semilla de chiltepín (*C. annuum* var. *glabriusculum*) procedentes de la cosecha anterior. Las semillas fueron inmersas durante 24 h en agua destilada con ácido giberélico (500 ppm) y, a continuación, se sembraron en charolas de poliestireno de 128 cavidades que contenían sustrato comercial BM2 (Berger®), compuesto por una mezcla de turba, perlita y vermiculita (pH=5.5). Durante la fase de semillero se mantuvo riego diario, con aplicación de solución nutritiva Steiner (pH= 5.5 y CE= 0.8 $dS \cdot m^{-1}$) cuando se presentaron las primeras hojas verdaderas. Las plántulas se consideraron aptas para el trasplante al presentar ocho hojas verdaderas y 20 cm de altura.

Diseño experimental. El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos y cuatro repeticiones. Los tratamientos consistieron en solución nutritiva Steiner (1984) con diferente potencial osmótico (MPa): T1= -0.036, T2= -0.054, T3= -0.072 y T4= -0.090 MPa (Cuadro 1). Cada unidad experimental comprendió una bolsa de polietileno negro conteniendo una planta de chiltepín. El arreglo espacial consistió en líneas con distancias de 0.50 m entre plantas y 1.50 m entre hileras, con una densidad de plantación de 13 333 plantas ha^{-1}.

Manejo agronómico. El cultivo se manejó bajo un sistema semihidropónico con riego por goteo con emisores tipo botón con gasto de 8 L h^{-1} y distribuidores tipo estaca. Las plántulas se trasplantaron a bolsas de polietileno negro (37x37 cm, capacidad 13 L) conteniendo arena de río como sustrato. Previo al trasplante, se realizó la desinfección

del sustrato con aplicación de hipoclorito de sodio (200 ppm, pH= 4) y, seguido de un riego pesado para eliminar el exceso de sales.

Cuadro 1. Contenido nutrimental de la solución nutritiva Steiner aplicada en chile chiltepín (*Capsicum annuum* var. *glabriusculum*) a diferente potencial osmótico.

Tratamiento	Potencial osmótico	NO_3^{-1}	$H_2PO_4^{-1}$	SO_4^{-2}	Ca^{+2}	K^{+1}	Mg^{+2}
	MPa	meq L^{-1}					
T1	-0.036	6.0	0.50	3.50	4.50	3.50	2.0
T2	-0.054	9.0	0.75	5.25	6.75	5.25	3.0
T3	-0.072	12.0	1.00	7.00	9.00	7.00	4.0
T4	-0.090	15.0	1.25	8.75	11.25	8.75	5.0

Durante los primeros 15 días post-trasplante se aplicó solución nutritiva Steiner (pH= 5.5 y CE=1.0 dS m^{-1}) y posteriormente, se implementaron los tratamientos experimentales. El chiltepín se condujo bajo un sistema de tutorado holandés con espaldera en "V" a crecimiento libre. La estructura de soporte se instaló con rafia de polipropileno blanco, colocando el primer nivel a 15 cm de altura. La polinización asistida se realizó manualmente durante la floración-fructificación, aplicando vibraciones mecánicas sobre los tutores.

Variables de respuesta. La concentración de NO_3^{-1} en el extracto celular de pecíolo se realizó a los 36, 50 y 64 ddt. Las muestras de pecíolo se recolectaron entre las 8:30 y 11:00 am, obteniendo 25-30 pecíolos de hojas recientemente maduras (4ta-5ta hoja desde el meristemo apical). Las muestras se colocaron en bolsas de polietileno transparente y se transportaron en un contenedor hermético con hielo hasta su procesamiento en laboratorio. Para el análisis, el pecíolo se desprendió de la hoja y se cortó en segmentos de 1 mm, los cuales se introdujeron en una jeringa de 3 mL donde se maceró hasta obtener una alícuota del extracto celular. Para finalizar, se colocó en el sensor específico para determinar NO_3^{-1} (Horiba®).

Análisis estadístico. Los datos obtenidos fueron transformados con log(x) para cumplir con los supuestos de normalidad (prueba de Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianza (Prueba de Levene). Una vez validados los supuestos, se realizó un análisis de varianza (α=0.05) y las diferencias significativas entre tratamientos se determinaron mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey (HSD), utilizando el software R (versión 4.4.1, R Core Team, 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La concentración de nitrato en el ECP no mostró diferencias estadísticas significativas entre tratamientos en los muestreos de 50 y 64 ddt. El rango de concentración NO_3^{-1} a los 50 ddt fue de 6 225-7 600 ppm y de 5 425-7 425 ppm a los 64 ddt. A los 78 ddt, los potenciales osmóticos de -0.054, -0.072 y -0.090 MPa fueron significativamente superiores a la concentración de nitratos en -0.036 MPa (Cuadro 2).

En la dinámica de la concentración de NO_3^{-1} en el extracto celular de pecíolo se observó decrecimiento a medida que progresó el crecimiento del cultivo. Tendencia similar fue reportada por Padilla *et al.,* (2017) aunque con valores menores en la concentración de NO_3^{-1} en ECP de chile pimiento al aplicar a la solución 9.2 y 10 mmol N. Estos autores no encontraron diferencias a los 33 y 68 ddt en la concentración de nitrato entre los tratamientos, sin embargo, obtuvo valores promedio de 3500 ppm para 33 ddt y en el rango de 3 000-3 250 ppm a los 68 ddt. A los 94 ddt, la concentración de nitrato fue diferente entre el manejo de la fertilización con N de 10 mM (3 100 ppm) y la aplicación de 9.2 mM de N (2 750 ppm).

Por su parte, valores menores encontró Rodríguez *et al.,* (2021) en las concentraciones de NO_3^{-1} en la savia a lo largo del desarrollo y crecimiento de pimiento dulce al aplicar 6.2 y 12.6 mmol NO_3^{-1} en dos años de evaluación. En el año 2016 a los 50, 64 y 78 ddt al aplicar 6.2 mM NO_3^{-1} encontraron concentraciones de nitratos en ECP de 1400, 1000, 650 ppm, mientras que con 12.6 mM obtuvieron 1650, 1800, 1700 ppm, respectivamente. En el año subsecuente, a los 47, 61 y 75 ddt observaron que la aplicación de 6.2 mM mostró concentraciones de 760, 780 y 250 ppm y para 12.6 mM fue de 2200, 1800, 1500 ppm, respectivamente.

Esta respuesta diferencial en las concentraciones de NO_3^{-1} en el ECP puede ser causa de la interacción planta-ambiente, la concentración de nitrógeno y la etapa fenológica del cultivo (Rodríguez *et al.,* 2023). Dado que no existen parámetros de NO_3^{-1} en chiltepín, las investigaciones podrían enfocarse en la búsqueda de las relaciones del nitrato con otros elementos en el ECP y concentraciones aplicadas en las soluciones nutritivas para obtener niveles de deficiencia, suficiencia y toxicidad.

Cuadro 2. Concentración de nitratos (ppm) en el extracto celular de pecíolo de chile chiltepín por efecto del potencial osmótico de la solución nutritiva Steiner.

Tratamientos	ddt		
	50	64	78
-0.036 MPa	7 600*	7 425	2 775 b
-0.052 MPa	6 450	4 725	4 525 a
-0.072 MPa	7 225	4 500	4 625 a
-0.090 MPa	6 225	5 425	4 475 a
P-valor	0.166	0.086	0.014

*Medias seguidas de distinta letra dentro de la misma columna son estadísticamente diferentes según prueba de comparación múltiple de Tukey ($P < 0.05$).

CONCLUSIONES

Prolongar un potencial osmótico de -0.036 MPa hasta los 78 ddt en chiltepín disminuye la concentración de nitrato en el extracto celular del pecíolo. Futuras investigaciones podrían enfocarse en la búsqueda de los niveles óptimos de NO_3^{-1} y de otros nutrientes en el ECP en las diferentes fases fenológicas durante el ciclo productivo de chiltepín.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por la beca otorgada bajo el número CVU-735739, destinada al desarrollo de estudios de doctorado.

BIBLIOGRAFÍA

Araiza, L.N., Araiza, L.E. & Martínez, M.J.G. (2011). Evaluación de la germinación y crecimiento de plántula de chiltepín (*Capsicum annuum* L. variedad *glabriusculum*) en invernadero. *Revista Colombiana de Biotecnología, 13*(2):170-175.

Navarro, G.G. & Navarro, G.S. (2013). Química agrícola. Química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas (3.ª Eds). Editorial Mundiprensa.

Padilla, F.M., Peña-Fleitas, M.T., Fernández, M. D., del Moral, F., Thompson, R.B. & Gallardo, M. (2017). Response of soil properties, crop yield and root growth to improved irrigation and N fertilization, soil tillage and compost addition in a pepper crop. *Scientia Horticulturae*, 225:422-430. http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2017.07.035.

Rodríguez, A., Peña-Fleitas, M.T., Padilla, F.M., Gallardo, M. & Thompson, R.B. (2021). Petiole sap nitrate concentration to assess crop nitrogen status of greenhouse sweet pepper. *Scientia Horticulturae*, 285:110157. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110157.

Rodríguez, A., Peña-Fleitas, M.T., Padilla, F.M. Gallardo, M. & Thompson, R.B. (2023). Effect of cultivar on measurements of nitrate concentration in petiole sap and leaf N in greenhouse soil-grown cucumber, melón, and sweet pepper crops. *Scientia Horticulturae*, 320:112200. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112200.

R Core Team. (2023). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.4.1) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/.

EFECTO DE LOS BIOFERTILIZANTES EN EL RENDIMIENTO DE CHILE (*Capsicum annuum* L.)

Maribel Bañuelos De Luna[1]; Rodolfo de la Rosa Rodríguez[2]; Alfredo Lara Herrera[1]; Julio Lozano Gutiérrez[1]; Luis Octavio Solís Sánchez[2]

[1] Unidad Académica de Agronomía de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Carretera Zacatecas-Guadalajara Km. 15.5 C.P. 98170 Zacatecas, Zac. México.

[2] Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Avenida Ramón López Velarde 801, Colonia Centro, C.P. 98000, Zacatecas, Zac. México.

Correo del autor de correspondencia: rodo9003@gmail.com

RESUMEN

En la agricultura moderna es necesario buscar equilibrio entre la búsqueda de un aumento en producción y la conservación de los recursos que el medio ambiente nos provee para cultivar y los microorganismos son una alternativa para llegar a este fin. El uso de microorganismos en la producción de chile puede impactar aumentando su capacidad de producción y mejorando la calidad y el rendimiento de frutos cosechados. Con base en esto se propuso el objetivo de evaluar el rendimiento y la calidad de chile pasilla con distintos materiales biofertilizantes. Los tratamientos fueron 1) Testigo, 2) Producto de consorcio microbiano (THD), 3) Producto Fosfonato, 4) Producto Tetracil (Bacillus spp.), 5) Producto Endospor, 6) Producto Tetracil caducado, 7) Producto de consorcio microbiano THD (Micorrizas, Azospirillum *brasilense*) caducado, 8) Cepas de *Trichoderma* aisladas en la Unidad Académica de Agronomía (UAA) de la UAZ, 9) Bacterias benéficas del género *Bacillus* spp. aisladas en la UAA de la UAZ y 10) *Trichoderma* y bacterias en combinación. El resto de los tratamientos fueron los ya mencionados más una inoculación extra. Se midieron categorías Extra, Primera, Segunda y Desecho, también el rendimiento. El tratamiento Tetracil destacó frente a otros biofertilizantes en calidad y rendimiento entre un 6 y 8% del total cosechado, aun en su versión caducada, por lo que resulta una alternativa competitiva en la producción y además con mayor duración para su uso.

PALABRAS CLAVE: *Calidad; microorganismos; producción; sustentabilidad.*

INTRODUCCIÓN

En el estado de Zacatecas el chile es uno de los cultivos más producidos y de gran importancia además es uno de los principales productores del país, son diversos problemas que enfrentan los productores de chile, uno de ellos es que el aporte de nutrimentos que se realiza principalmente a base de fertilizantes químicos, pero estos han incrementado sus precios de manera importante lo cual reduce la competitividad de los productores, esto demanda la búsqueda de alternativas de mejora para la producción de chile. Una de esas alternativas es el uso de los microorganismos en la producción de chile, ya que pueden impactar aumentando su capacidad de producción. Estos microbios

favorecen la accesibilidad a nutrientes, producción de hormonas de crecimiento, entre muchas otras funciones, aumentan la productividad de las plantas, ya sea directa o indirectamente. En la agricultura moderna es necesario buscar equilibrio entre la búsqueda de un aumento en producción y la conservación de los recursos que el medio ambiente nos provee para cultivar y los microorganismos son una alternativa para llegar a este fin con sus múltiples efectos en aumento de productividad, pero también en la mitigación del impacto ambiental negativo del uso desmedido de los productos químicos (Palacios-López, 2023). Específicamente en el chile se ha probado que la inoculación de microorganismos mejora el rendimiento cuando se aplican de manera individual o en consorcio (Kanchana *et al*., 2014). Aún es necesario generar más información al respecto, por esta razón el objetivo de este trabajo fue evaluar el rendimiento del chile pasilla con distintas inoculaciones de microrganismos como biofertilizantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación. El trabajo se realizó en la Unidad Académica de Agronomía de la UAZ, en dos invernaderos semicubiertos ubicados en 22°43'42.4"N 102°41'08.9"W, Cieneguillas, Zacatecas.

Material Vegetal. El material utilizado es semilla de chile pasilla criollo.

Producción de Plántula y Trasplante. La plántula se generó en un almácigo con protección de agrovelo. Se realizó el trasplante a 30 cm entre plantas con arreglo tres bolillo. Las camas tenían una longitud total de 20 m y un ancho de 0.75 m, dando un total de 20 camas.

Tratamientos y diseño experimental. Los tratamientos fueron 20 con seis repeticiones, constituidos por productos comerciales nuevos y versiones caducadas de uno a dos meses de algunos de ellos, siendo los siguientes: 1Testigo, 2Producto de consorcio microbiano (THD), 3Producto Fosfonat, 4Producto Tetracil (*Bacillus* spp.), 5Producto Endospor, 6Producto Tetracil caducado, 7Producto de consorcio microbiano THD (Micorrizas, *Azozpirillum brasilense*) caducado, 8Cepas de *Trichoderma* aisladas en la Unidad Académica de Agronomía (UAA) de la UAZ, 9Bacterias benéficas del género *Bacillus* spp. aisladas en la UAA de la UAZ y 10 *Trichoderma* y Bacterias en combinación, el resto de los tratamientos fueron los ya mencionados más una inoculación extra que se llevó a cabo a los 15 días después del trasplante, aplicando una concentración de 20 ml de producto, pero solo en la mitad de las camas donde fueron aplicados para observar también el efecto de una segunda inoculación.

Variables medidas. Calidad de frutos. Esta determinación fue basada en una clasificación de frutos de acuerdo a la norma NMX-FF-107/1-SCFI-2006 y con ello se estableció una clasificación de acuerdo al tamaño de frutos con las siguientes categorías: Extra (> 20 cm de largo), Primera (14-20 cm de largo) y Segunda (< 14 cm de largo).

Rendimiento. Para esta determinación se utilizaron las mismas categorías incluyéndose la categoría "desecho". Esta variable se determinó con el peso de los frutos producidos por metro cuadrado utilizando una báscula Kern AES 200-4N.

Análisis estadístico. La información recabada se analizó en un diseño de bloques completos al azar en el programa SAS versión 9.4 con un análisis de varianza y una prueba de medias con el criterio de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Número de frutos. Extra. El biofertilizante THD caducado y la combinación de *Trichoderma* y Bacterias benéficas con una y dos inoculaciones mostraron loas valores más bajos (2, 2.5 y 1.3% respectivamente) en esta categoría con respecto Tetracil caducado con una inoculación y Tetracil con dos inoculaciones (9.7 y 8.7% respectivamente), ambos iguales estadísticamente (Cuadro 1), el resto de los materiales ensayados fue igual estadísticamente. **Primera.** En esta categoría predominó Tetracil caducado obteniendo 6.8% del número total de frutos, superando al testigo con mayor número de frutos (3.4%), también fue superior (2.8, 2.9 y 3.5% respectivamente) a THD caducado, Bacterias y la combinación de *Trichoderma* y Bacterias todos con dos inoculaciones (Cuadro 1). El resto de los biofertilizantes tuvieron nula diferencia con el Tetracil caducado. Estos resultados son similares a lo reportado por Mejía-Bautista *et al.* (2022) quienes encontraron aumento en el número de frutos por la aplicación de *Bacillus* sp. Estos resultados se deben a que *Bacillus* favorece incrementa el número de yemas florales lo que se traduce en mayor número de frutos (Peña-Yam *et al*., 2016). **Segunda.** La combinación de *Trichoderma* y las bacterias benéficas resultó de importancia en esta categoría con el 7.5% del total de frutos y con esto superó al testigo y además a Tetracil caducado y a Endospor con una y dos inoculaciones (con sólo 3.7% en promedio), con el resto de los materiales ensayados no tuvo diferencias estadísticas (Cuadro 1). Los microorganismos promueven componentes del rendimiento en forma unitaria o en consorcio (Kanchana *et al*., 2014) y en aplicaciones de *Trichoderma* con *Bacillus* puede favorecer número de frutos (Gamboa-Angulo, 2021).

Rendimiento de frutos. Extra. En esta categoría prevaleció el producto Tetracil caducado con una sola inoculación estando por encima de THD caducado, las Bacterias benéficas solas con y su combinación con *Trichoderma*, pero en ambos casos con dos inoculaciones. Con el resto de los biofertilizantes Tetracil caducado no tuvo diferencias estadísticas (Cuadro 1). **Primera.** En esta categoría el producto Tetracil destacó con 7.8% del total cosechado siendo superior al testigo, pero también superó a la aplicación de Bacterias benéficas y THD caducado con una y dos inoculaciones, a *Trichoderma* con una sola inoculación y también combinado con las Bacterias, pero sólo con dos inoculaciones (Cuadro 1), el resto de los materiales utilizados fue estadísticamente igual entre sí y al Tetracil. **Segunda.** Para esta categoría la combinación de *Trichoderma* mostró superioridad con el testigo y dos materiales biofertilizantes más (Endospor con dos inoculaciones y Tetracil caducado), aunque sólo con dos inoculaciones, el resto de los biofertilizantes fue igual a esta combinación (Cuadro 1). **Desecho.** En esta categoría de chile no predominó ningún material biofertilizante utilizado ya que no se tuvieron diferencias estadísticas (Cuadro 1). Estos efectos pueden deberse a que Tetracil está compuesto por especies de *Bacillus* y se consideran BPCV, contribuyen en la generación de fitohormonas promoviendo el crecimiento vegetal (Wagi y Ahmed, 2019), favorecen la producción de sideróforos (Rizzi *et al*., 2019), también puede solubilizar fósforo

(Prakash y Arora, 2019) que tiene un afecto favorable en la síntesis de metabolitos y aumento de materia seca, proteger contra fitopatógenos (He *et al*., 2019) y todos estos factores favorecen la producción de frutos. Los resultados de la presente investigación son similares a lo encontrado por Lara-Capistrán *et al*. (2019), quienes aumentaron las variables agronómicas de chile con aplicaciones de *Bacillus subtilis*.

Cuadro 1. Rendimiento y número de frutos por efecto de biofertilizantes en producción de chile pasilla.

	Categorías						
	Extra		Primera		Segunda		Desecho
Tratamiento	Número de Frutos	Peso (g/m2)	Número de Frutos	Peso (g/m2)	Número de Frutos	Peso (g/m2)	Peso (g/m2)
Testigo	20abc	48.0abc	36cd	77.7c	28bc	38.7b	24.7a
THD	16abc	40.7abc	62abcd	136.2abc	39abc	59.0ab	29.0a
Fosfonat	25abc	50.7abc	65abc	132.9abc	42abc	64.6ab	16.7a
Tetracil	28ab	79.5ab	71ab	171.6a†	34abc	54.0ab	29.8a
Endospor	21abc	61.7abc	64abc	127.1abc	25c	42.9ab	21.6a
Tetracil Cad	33a	84.4a	72a	165.1ab	35abc	56.7ab	17.1a
THD Cad	7c	13.8c	43abcd	83.6c	45abc	63.3ab	22.7a
Trichoderma	14abc	31.1abc	48abcd	101.7bc	30abc	46.1ab	14.8a
Bacterias B	13abc	27.7bc	52abcd	100.9bc	50ab	69.5ab	18.3a
Tricho y Bac	8bc	34.6abc	53abcd	103.2abc	39abc	59.4ab	16.8a
THD-2	17abc	43.7abc	58abcd	129.0abc	44abc	62.6ab	25.4a
Fosfonat-2	25abc	56.1abc	60abcd	119.9abc	38abc	48.6ab	20.1a
Tetracil-2	29a	70.3ab	64abc	123.7abc	38abc	52.1ab	28.8a
Endospor-2	17abc	42.1abc	62abcd	129.9abc	26bc	37.0b	16.7a
Tetracil Cad-2	19abc	45.9abc	56abcd	108.1abc	29bc	40.3b	18.0a
THD Cad-2	13abc	34.1abc	42bcd	100.4bc	46abc	73.6ab	33.0a
Trichoderma-2	16abc	42.9abc	60abcd	131.2abc	39abc	57.4ab	18.2a
Bacterias-2	13abc	32.7abc	42bcd	93.3c	47abc	72.2ab	30.6a
Tricho y Bac-2	4c	10.2c	35d	70.2c	55a	78.2a	15.8a
DMS	20.613	54.42	28.91	68.62	24.746	36.78	20.66

Tetracil Cad=Tetracil caducado; THD Cad=THD caducado; Bacterias B=Bacterias benéficas; Tricho y Bac=*Trichoderma* y Bacterias benéficas en combinación; THD-2=THD dos inoculaciones; Fosfonat-2=Fosfonat con dos inoculaciones; Tetracil-2=Tetracil con dos inoculaciones; Endospor-2=Endospor con dos inoculaciones; Tetracil Cad-2= Tetracil caducado con dos inoculaciones; THD Cad-2= THD caducado con dos inoculaciones; Trichoderma-2=*Trichoderma* con dos inoculaciones; Bacterias-2=Bacterias con dos inoculaciones; y Tricho y Bac-2=*Trichoderma* y Bacterias con dos inoculaciones. † = Cifras seguidas con la misma letra en cada columna son iguales ($p \leq 0.05$), DMS = Diferencia mínima significativa.

CONCLUSIONES

El biofertilizante Tetracil (*Bacillus* spp.) demostró incrementos en número de frutos y también en los gramos por metro cuadrado en comparación con otros biofertilizantes.

Tetracil fue efectivo y destacó aun cuando se aplicó caducado y con dos, pero también con una inoculación solamente. *Trichoderma* combinado con bacterias benéficas puede dar un buen número de frutos de segunda calidad. Todos los biofertilizantes tuvieron el mismo desecho, por lo que todos pueden promover rendimiento similar, aunque en diferentes calidades.

BIBLIOGRAFÍA

Gamboa-Angulo, J., Ruíz-Sánchez, E., Alvarado-López, C., Gutiérrez-Miceli, F., Ruíz-Valdiviezo, V. M., & Medina-Dzul, K. (2020). Efecto de biofertilizantes microbianos en las características agronómicas de la planta y calidad del fruto del chile xcat´ ik (*Capsicum annuum* L.). *Terra Latinoamericana*, 38(4): 817-826. https://doi.org/10.28940/terra.v38i4.716.

He, Y., M. Zhu, J. Huang, T. Hsiang & Zheng, L. (2019). Biocontrol potential of a *Bacillus subtilis* strain BJ-1 against the rice blast fungus *Magnaporthe oryzae*. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 41: 47-59. doi: https://doi.org/10.1080/07060661.2018.1564792.

Kanchana, D. M., Jayanthi, G., Usharani, P., Saranraj, & Sujitha D. (2014). Interaction effect of combined inoculation of PGPR on growth and yield parameters of chilli var k1 (*Capsicum annuum L.*). *International Journal of Microbiology Research*, 5: 144-151. doi: https://doi.org/10.5829/idosi.ijmr.2014.5.3.81232.

Lara-Capistrán, L., Zulueta-Rodríguez, R., Murillo-Amador, B., Romero-Bastidas, M., Rivas-García, T., & Hernández-Montiel, L. G. (2020). Respuesta agronómica del chile dulce (*Capsicum annuum* L.) a la aplicación de *Bacillus subtilis* y lombricomposta en invernadero. *Terra Latinoamericana*, 38(3): 693-704.

Palacios-López, L.A. (2023). El uso de biofertilizantes en la agricultura moderna sus avances, desafíos y perspectivas. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 1(2): 52-64. https://doi.org/10.70881/mcj/v1/n2/16

Peña-Yam, L. P., Ruíz-Sánchez, E., Barboza-Corona, J. E. & Reyes-Ramírez, A. (2016). Isolation of Mexican Bacillus species and their effects in promoting growth of chili pepper (*Capsicum annuum* L. cv jalapeño). *Indian Journal of Microbiology*, 56(3):375-378. https://www.ncbi. nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4920762/.

Prakash, J. & N. K. Arora. (2019). Phosphate-solubilizing *Bacillus* sp. enhances growth, phosphorus uptake and oil yield of *Mentha arvensis* L. 3 *Biotech*, 9: 126. doi: https://doi.org/10.1007/s13205-019-1660-5.

Rizzi, A., S. Roy, J. P., Bellenge & P. B. Beauregard. (2019). Iron homeostasis in *Bacillus subtilis* requires siderophore production and biofilm formation. *Applied and Enviromental Microbiology*, 85: e02439-18. doi: https://doi.org/10.1128/AEM.02439-18.

Wagi, S. & Ahmed, A. (2019). *Bacillus* spp.: potent microfactories of bacterial IAA. *PeerJ Publishing*, 7: e7258. doi: https://doi.org/10.7717/peerj.7258.

EFICIENCIA DE LA APLICACIÓN DE NANOFERTILIZANTES DE MO-ZN SOBRE LOS PARÁMETROS DE INTERCAMBIO GASEOSO EN PORTAINJERTOS DE NOGAL PECANERO

Julio César Anchondo Páez[1]; Esteban Sánchez Chávez[1]; Carlos Abel Ramírez Estrada[1]; Cristina Larissa Franco Lagos[1]; Alan Álvarez Monge[1]; Juan José Patiño Cruz[1]; Erick Humberto Ochoa Chaparro[1]

[1] Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, Av. 4 Sur 3828, Fracc. Vencedores del Desierto, 33088 Delicias, Chihuahua, México.

Correo del autor de correspondencia: esteban@ciad.mx

RESUMEN

La producción de portainjertos de nogal pecanero tiene diversas problemáticas como el cambio climático, altas temperaturas o salinidad de los suelos. Por esta razón, el uso de portainjertos adaptados a las condiciones locales y su manejo adecuado a través de nanofertilizantes podrían ser claves para el establecimiento de huertas nogaleras. Por consiguiente, se realizó un experimento con portainjertos Criollos, Riverside y Pawnee de aproximadamente un año de edad, sujetos a dosis de 0, 50, 100 y 200 mg L^{-1} aplicados de forma foliar utilizando un nanofertilizante elaborado con Mo-Zn. El objetivo fue evaluar la eficiencia de la aplicación de nanofertilizantes de Mo-Zn sobre los parámetros de intercambio gaseoso en portainjertos de nogal pecanero. Los resultados obtenidos indican que no existen interacciones significativas entre el portainjerto y dosis empleadas, sugiriendo que los efectos encontrados son debidos al portainjerto empleado. El portainjerto Riverside presentó la mayor eficiencia fotosintética y la mayor tasa de transpiración, mientras que el portainjerto criollo exhibió la menor tasa de transpiración y eficiencia fotosintética. Estas características podrían permitir a los productores escoger el tipo de portainjerto que se adapta mejor a las condiciones locales para el establecimiento de huertas nogaleras.

PALABRAS CLAVE: *intercambio gaseoso; nanotecnología; portainjertos.*

INTRODUCCIÓN

El establecimiento de huertas nogaleras requiere de la elección cuidadosa de los portainjertos a utilizar. Esto se debe a que el empleo de portainjertos adaptados a las condiciones climáticas y edáficas locales promueve el desarrollo de árboles vigorosos y sistemas radiculares robustos. El empleo de nanofertilizantes, junto con el portainjerto adecuado, puede estimular procesos fisiológicos clave gracias a sus propiedades fisicoquímicas únicas, mientras se disminuye la pérdida de nutrientes.

Los nanofertilizantes pueden estar basados en varios elementos de los cuales destacan el zinc (Zn) y molibdeno (Mo). El Zn es un micronutriente crucial para el crecimiento y desarrollo del nogal pecanero debido a su participación en diversos procesos fisiológicos fundamentales como la fotosíntesis, producción de semillas, metabolismo nitrogenado y

transferencias de energía (Pokrel *et al*., 2025). El Mo por su parte tiene un rol fundamental en el metabolismo vegetal al ser cofactor de las enzimas nitrato reductasa, sulfito oxidasa y xantina deshidrogenasa.

Los beneficios de la aplicación de Zn y Mo están documentados en diversos cultivos como el maíz, trigo y tabaco (Shoukat *et al*., 2024).

Existe escasa información acerca del uso de nanofertilizantes en especies perennes como el nogal pecanero. Por tanto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la eficiencia de la aplicación de nanofertilizantes de Mo-Zn sobre los parámetros de intercambio gaseoso en portainjertos de nogal pecanero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento fue realizado en Nuevo San Lucas, Chihuahua, México (N 28°35′72″, -105°56′8 6″). Se utilizaron portainjertos de nogal pecanero Criollo, Pawnee y Riverside de aproximadamente un año, desarrollados bajo condiciones de vivero. A partir del rebrote de las hojas durante la temporada 2025, se aplicó vía foliar el nanofertilizante Mo-Zn Broadacre® (densidad= 1.78 g cm^{-3}, Mo=3.30 p/p% y Zn=35 p/p%) a dosis de 0, 50, 100 y 200 mg L^{-1} durante 3 meses. La irrigación fue mediante la solución de Hoagland utilizando 1.5 L por día. Las características del agua utilizada para la formulación de la solución nutritiva son descritas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Descripción de las concentraciones de cationes, aniones salinidad y sodicidad del agua empleada para formular la solución nutritiva

Cationes (mg L^{-1})	Aniones (mg L^{-1})	Salinidad y sodicidad
Calcio (71.16)	Carbonatos (0)	pH (7.32)
Magnesio (8.64)	Bicarbonatos (328.66)	Conductividad eléctrica (0.750 dS m^{-1})
Sodio (82.61)	Sulfatos (98.42)	Porciento de sodio (44.90%)
Potasio (4.68)	Cloruros (19.58)	Salinidad efectiva (3.71 Meq)
Boro (0.14)		Clasificación (C2-S1)

Diseño experimental. Se colocaron un total de 12 tratamientos con 6 repeticiones cada uno en un diseño experimental completamente aleatorizado de dos vías. Los factores incluyeron la variedad de portainjerto (Criolla, Riverside y Pawnee) y el nanofertilizante Mo-Zn de Broadacre® aplicado a dosis de 0, 50, 100 y 200 mg L^{-1} durante la temporada de crecimiento de 2025, que incluye los meses de abril, mayo y junio.

Intercambio gaseoso. Las mediciones del intercambio gaseoso se realizaron en cada planta utilizando un fotosistema portátil LI-6400 (LI-COR, Lincoln, NE, EE.UU.), eligiendo hojas sanas y no dañadas para mantener la consistencia. La concentración de referencia se fijó en 410 µmol mol^{-1} de CO_2, mientras que la célula de muestra se mantuvo en 380 µmol mol^{-1}. El déficit de presión de vapor (VPD) en la cámara de la hoja se mantuvo por debajo de 1,5 kPa y el bloque de la cámara de la hoja se mantuvo a 30 °C. La actividad fotosintética se expresó como µmol CO_2 m^2 s^{-1}, las tasas de transpiración en mmol H_2O m^2 s^{-1}, la conductancia estomática como mol CO_2 m^2 s^{-1} y la eficiencia del fotosistema II como Fv/Fm.

Análisis estadístico. Para determinar la existencia de diferencias significativas entre variables, se utilizó un ANOVA bifactorial ($p \leq 0.05$). En aquellos casos donde se encontraron diferencias, se realizó la prueba de separación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$). Para ello se utilizó el programa estadístico SAS versión 9.0

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fotosíntesis es el proceso fisiológico por el cual se captura la energía lumínica del sol y el CO_2 ambiental para su conversión en energía química útil para impulsar el crecimiento y desarrollo de los cultivos. En el presente estudio, el efecto principal de la variedad de portainjerto mostró diferencias significativas entre las variedades Criolla, Riverside y Pawnee (Figura 1A). En este caso, el portainjerto Riverside demostró la mayor actividad fotosintética con un aumento del 27%, en comparación con los otros portainjertos.

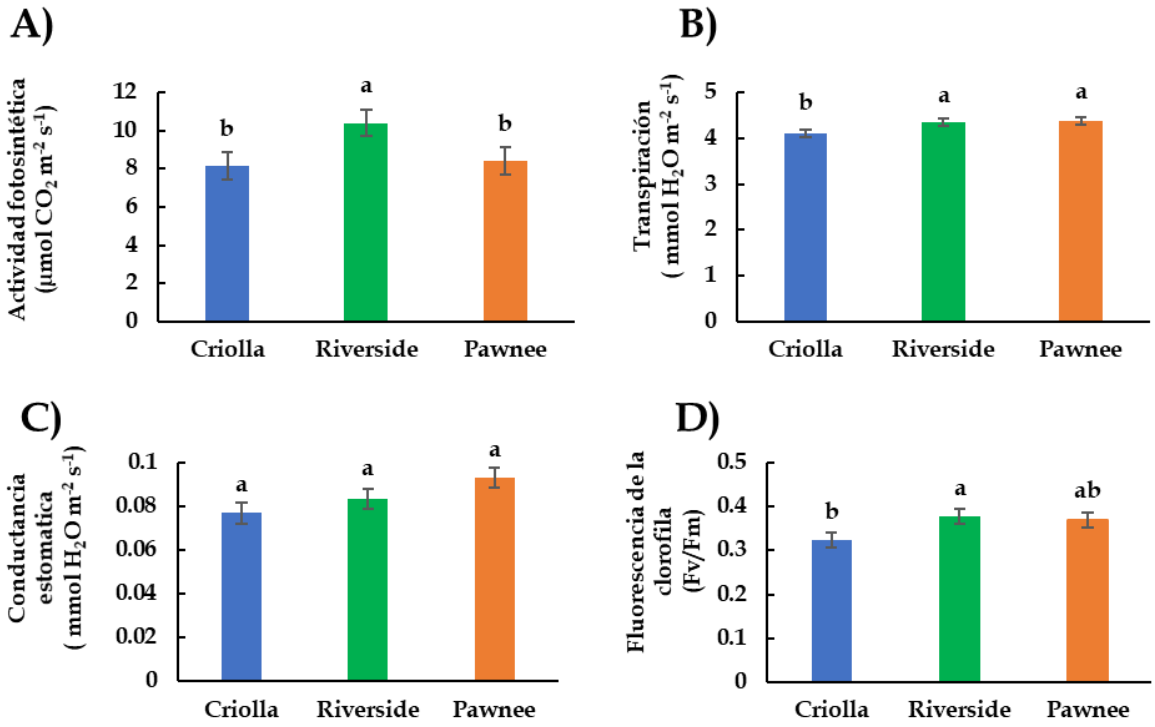
Los resultados encontrados podrían ser debidos al genotipo de cada uno de los materiales empleados, donde la adaptación de cada portainjerto es dependiente de su posición geográfica y, en consecuencia, mayor susceptibilidad o resistencia a los factores abióticos (Cervantes *et al*., 2022). Además, es posible que las dosis empleadas no hayan sido suficientes para impulsar cambios significativos en las variables del intercambio gaseoso evaluadas. La falta de efectos de las dosis empleadas contrasta con lo reportado en otros estudios, donde la aplicación de nanopartículas de Mo-Zn incrementó e impulsó el crecimiento y desarrollo de los cultivos al influenciar de manera positiva el intercambio gaseoso (Zafar *et al*., 2024).

En cuestión de la transpiración, esta se refiere al movimiento del agua a través de la planta con el objetivo de transportar nutrientes o para la regulación de temperatura. En la presente investigación, los efectos encontrados son debidos al portainjerto utilizado, destacando la variedad criolla con la menor tasa de transpiración, 0.21% en comparación con el resto de portainjertos (Figura 1B). Nuevamente, los resultados obtenidos pueden explicarse por el genotipo de los portainjertos, cuya adaptación está determinada por su procedencia geográfica y su tolerancia diferencial a los factores abióticos. Las dosis empleadas podrían no haber sido las adecuadas para inducir modificaciones relevantes en la variable evaluada. Con respecto a la conductancia estomática, que es la apertura de los estomas para la entrada de CO_2 y la salida de agua, no se encontraron diferencias significativas entre el portainjerto utilizado y las dosis empleadas. Sin embargo, el portainjerto Pawnee tuvo la mayor conductancia estomática, con un incremento del 0.21% con respecto a los demás portainjertos (Figura 1C). Reiteradamente, el efecto del genotipo de los portainjertos, su adaptación al medio y la insuficiencia de las dosis evaluadas podrían explicar estos resultados.

Finalmente, la fluorescencia de la clorofila describe la eficiencia de la actividad fotosintética, donde nuevamente los efectos encontrados son debidos al portainjerto empleado. Nuevamente, el portainjerto Riverside presentó la mayor eficiencia fotosintética comparado con las variedades Criolla y Pawnee, con un aumento del 0.17%

(Figura 1D). El efecto del genotipo y el empleo de dosis inadecuadas podrían explicar los resultados.

Figura 1. Efecto de la variedad de portainjerto empleado sobre: A) La actividad



fotosintética, B) La tasa de transpiración, C) Conductancia estomática y D) Fluorescencia de la clorofila.

Las letras diferentes representan diferencias estadísticas significativas entre tratamientos (Tukey $p \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

El portainjerto Riverside tuvo alta eficiencia fotosintética, así como altas tasas de transpiración, lo que sugiere que podría sostener un crecimiento vigoroso en condiciones de suficiencia hídrica. En cambio, el portainjerto Pawnee tiene un comportamiento parecido a Riverside, pero con menores eficiencias fotosintéticas y puede ser una opción cuando se espera mayor resiliencia que Riverside.

El portainjerto criollo presentó menores tasas de transpiración, conductancia estomática y eficiencia fotosintética, conservando mejor el agua e indicando su potencial en zonas con estrés hídrico.

BIBLIOGRAFÍA

Beig, B., Niazi, M. B. K., Jahan, Z., Zia, M., Shah, G. A., Iqbal, Z., & Douna, I. (2022). Facile coating of micronutrient zinc for slow-release urea and its agronomic effects on field-grown wheat (*Triticum aestivum* L.). *Science of the Total Environment*, *838*, 155965. https://doi.org/10.1007/s11998-023-00810-6

Cervantes, K., Heerema, R. J., & Randall, J. J. (2022). The core microbiome of *Carya illinoinensis* (pecan) seedlings of different maternal pecan cultivars from the same orchard. *Frontiers in Microbiomes*, *1*, 1003112. https://doi.org/10.3389/frmbi.2022.1003112

Chen, J., Yin, Y., Zhu, Y., Song, K., & Ding, W. (2023). Favorable physiological and morphological effects of molybdenum nanoparticles on tobacco (*Nicotiana tabacum* L.): root irrigation is superior to foliar spraying. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1220109. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1220109

Shoukat, A., Saqib, Z. A., Akhtar, J., Aslam, Z., Pitann, B., Hossain, M. S., & Mühling, K. H. (2024). Zinc and silicon nano-fertilizers influence ionomic and metabolite profiles in maize to overcome salt stress. *Plants*, *13*(9), 1224. https://doi.org/10.3390/plants13091224.

Zafar, S., Khan, S., Ibrar, D., Khan, M. K., Hasnain, Z., Mehmood, K., ... & Nawaz, M. (2024). Application of zinc nanoparticles as seed priming agent improves growth and yield of wheat seedlings grown under salinity stress by enhanced antioxidants activities and gas exchange attributes. *Cereal Research Communications*, *52*(4), 1551-1564. https://doi.org/10.1007/s42976-024-00499-2

ENHANCING PHOSPHORUS USE EFFICIENCY AND PLANT GROWTH WITH BAYÓVAR PHOSPHATE ROCK AND PHOSPHORUS-SOLUBILIZING MICROORGANISMS

Layara Alexandre Bessa[1,2]; Luciana Cristina Vitorino[1,2]; Mateus Neri Oliveira Reis[2]

[1] Laboratory of Agricultural Microbiology, Instituto Federal Goiano, Rio Verde Campus, Rodovia Sul Goiana, Km 01, Rio Verde 75901-970, GO, Brazil.
[2] Laboratory of Metabolism and Genetics of Biodiversity, Instituto Federal Goiano, Rio Verde Campus, Rio Verde.
Correo del autor de correspondecia: layara.bessa@ifgoiano.edu.br

ABSTRACT

Phosphorus availability in soils is often limited due to its frequent complexation with free cations, which can restrict plant productivity. Bayóvar phosphate rock powder is a cost-effective alternative for phosphorus supplementation, while phosphorus-solubilizing microorganisms can enhance nutrient availability. This study evaluated the effects of different doses of Bayóvar phosphate rock powder (0.0, 1.5, 3.0, 4.5, and 6.0 t ha^{-1}) and the inoculation with phosphorus-solubilizing microorganisms (*Paenibacillus alvei*, *Bacillus velezensis* + *Lysinibacillus fusiformis*, and *Methylobacterium symbioticum*) on *Glycine max* dry biomass, net photosynthetic rate, and soil enzyme activities. Plant dry biomass was measured after oven-drying, and the photosynthetic rate was assessed using an infrared gas analyzer (IRGA). The activities of β-glucosidase and arylsulfatase enzymes were quantified by spectrophotometry based on the release of p-nitrophenol. The results demonstrated that both Bayóvar phosphate rock doses and microorganism inoculation significantly increased plant dry biomass and net photosynthetic rate. The most pronounced effects were observed in plants inoculated with *P. alvei* and *B. velezensis* + *L. fusiformis* at the highest dose of 6 t ha^{-1} Bayóvar phosphate rock. For enzymatic activities, the highest levels of arylsulfatase and β-glucosidase were observed in soils inoculated with *P. alvei*. However, increasing doses of Bayóvar phosphate rock were associated with reductions in soil enzyme activity. These findings suggest that combining Bayóvar reactive phosphate with phosphorus-solubilizing microorganisms can enhance phosphorus use efficiency, promote plant growth, and boost agricultural productivity.

KEYWORDS: *Bioinputs; nutrients; PGPRs; phosphorus; soil enzymes.*

INTRODUCTION

Phosphate rocks, such as Bayóvar rock dust, are abundant and cost-effective natural sources of phosphorus (P), representing a promising strategy for supplying phosphate fertilizers to large-scale crops (Favaro *et al.*, 2022). Bayóvar rock dust has intermediate solubility and is classified as a reactive phosphate source, gradually releasing P over time (Benevides Filho *et al.*, 2023; Amorim *et al.*, 2024). This slow-release characteristic can reduce P fixation through adsorption and precipitation reactions.

Additionally, phosphate-solubilizing rhizobacteria (PSRs) have emerged as a viable alternative for enhancing P availability in soils (Rawat *et al.*, 2021; Sarmah and Sarma, 2023). Several PSR strains can solubilize P from rock dust by secreting organic acids, enzymes, and chelating compounds, thereby converting insoluble forms of P into plant-available forms (Kaur *et al.*, 2024; Fan et al., 2024).

Furthermore, PSRs can produce enzymes such as β-glucosidase and arylsulfatase, which are widely used as indicators of soil health and quality (Monteiro and Da Silva, 2021; Pintarič *et al.*, 2024). These bacteria thus play a key role in nutrient cycling and replenishment, as well as in maintaining soil quality and promoting plant growth. In this study, combinations of Bayóvar rock dust and varying PSR inoculation levels were tested to evaluate their interactive effects on soybean growth and physiology, along with their impact on soil enzymatic activity.

MATERIALS AND METHODS

The experiment was conducted in a greenhouse at the Metabolism and Genetics of Biodiversity Laboratory, IF Goiano – Rio Verde Campus. The treatments involved inoculation with the following rhizobacterial strains: *Paenibacillus alvei* (SVPAB), a consortium of *Bacillus velezensis* and *Lysinibacillus fusiformis* (Titânico®) (SVPSMIX), *Methylobacterium symbioticum* (Mitólogico®) (SVMTB), and a mixture of all four strains.

Untreated seeds of the soybean cultivar NEO 77012X, free from chemical treatment, were used. Sowing was performed in 3-liter pots filled with latosol, to which Bayóvar rock phosphate was applied at varying rates (0, 1.5, 3.0, 4.5, and 6.0 tons per hectare), depending on the treatment. The rock dust had the following chemical composition: 1.8% carbon (C), 0.2% hydrogen (H), 0.9% nitrogen (N), and 13.1% phosphorus (P). Seeds were sown in furrows at the center of the pots, and biological inoculants were applied at a concentration of 10^8 CFU mL^{-1}, following the recommended dose of 100 mL ha^{-1}.

Plants were evaluated at the R1 developmental stage. For dry biomass determination, the plants were dried in a forced-air greenhouse at 65°C until a constant weight was achieved. Gas exchange parameters were measured between 7:00 and 10:00 AM using an infrared gas analyzer (IRGA) equipped with an integrated fluorometer (model LI-6800XT, LI-COR Inc., Lincoln, USA), to determine the net photosynthetic rate (*A*, μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}). The enzymatic activities of β-glucosidase and arylsulfatase were measured spectrophotometrically, following the protocol described by Tabatabai (1994).

Data were analyzed using two-way ANOVA to assess the effects of microbial inoculation and Bayóvar rock phosphate application rates. Tukey's test was used for multiple comparisons among microbial treatments at a 5% significance level.

RESULTS AND DISCUSSION

Total plant dry matter was significantly influenced by both phosphate application rates and microbial inoculation. Inoculated plants exhibited higher average dry matter accumulation compared to non-inoculated controls (Figure 1a). Similarly, dry matter increased linearly with increasing doses of rock phosphate (Figure 1b). The net carbon assimilation rate (*A*) was also significantly affected by microbial treatments, with the

highest rates observed in plants inoculated with SVPAB and SVPSMIX (Figure 2c). Regarding the application of Bayóvar rock phosphate, *A* exhibited a linear response, reaching maximum values at the highest application rate of 6 t ha^{-1} (Figure 2d).

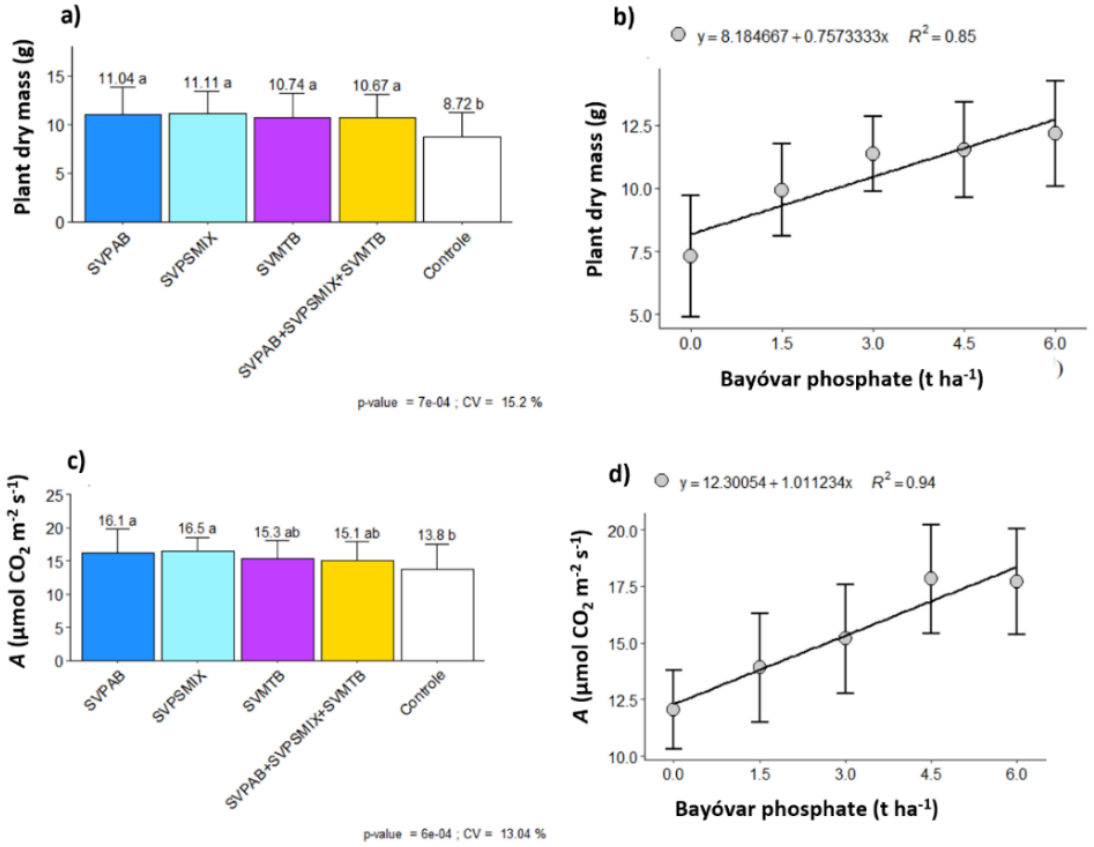


Figure 1. Total dry mass (a, b) and net photosynthetic rate (*A*) (c, d) of *Glycine max* L. plants inoculated with rhizobacteria and subjected to different doses of Bayóvar reactive phosphate. Means followed by the same letter do not differ significantly according to Tukey's test ($p < 0.05$).

Microbial inoculation stimulated biomass accumulation in *G. max* plants, indicating a synergistic effect between the availability of Bayóvar rock phosphate in the soil and microbial activity. The observed increase in biomass suggests enhanced root development, leading to improved soil exploration and greater uptake of water and nutrients (Holz *et al.*, 2024). Additionally, the increased shoot growth suggests improved light interception and higher photosynthetic efficiency (Chavarria *et al.*, 2017).

The observed increase in net carbon assimilation rate (*A*) is generally associated with improved plant nutritional status, which was evident in plants inoculated with SVPAB and SVPSMIX. These treatments enhanced photosynthetic efficiency, likely due to increased phosphorus (P) availability. Phosphorus is considered the second most critical nutrient for plants, as it plays a key role in the regeneration of ribulose-1,5-bisphosphate (RuBP), an essential molecule in the Calvin cycle that directly impacts CO_2 assimilation (Jin *et al.*, 2023; Khan *et al.*, 2023).

Soil arylsulfatase activity was affected by both microbial inoculation and phosphate application rates. The highest average arylsulfatase activity was observed in plants inoculated with SVPAB (Figure 6a). In contrast, the lowest activity was recorded at the highest phosphate rate (6 t ha^{-1}) (Figure 2b). Similarly, β-glucosidase activity was influenced by microbial treatments and varied with phosphate application. SVPAB inoculation resulted in the highest enzymatic activity (Figure 2c), while the lowest activity was observed at the phosphate dose of 5.3 t ha^{-1} (Figure 2d).

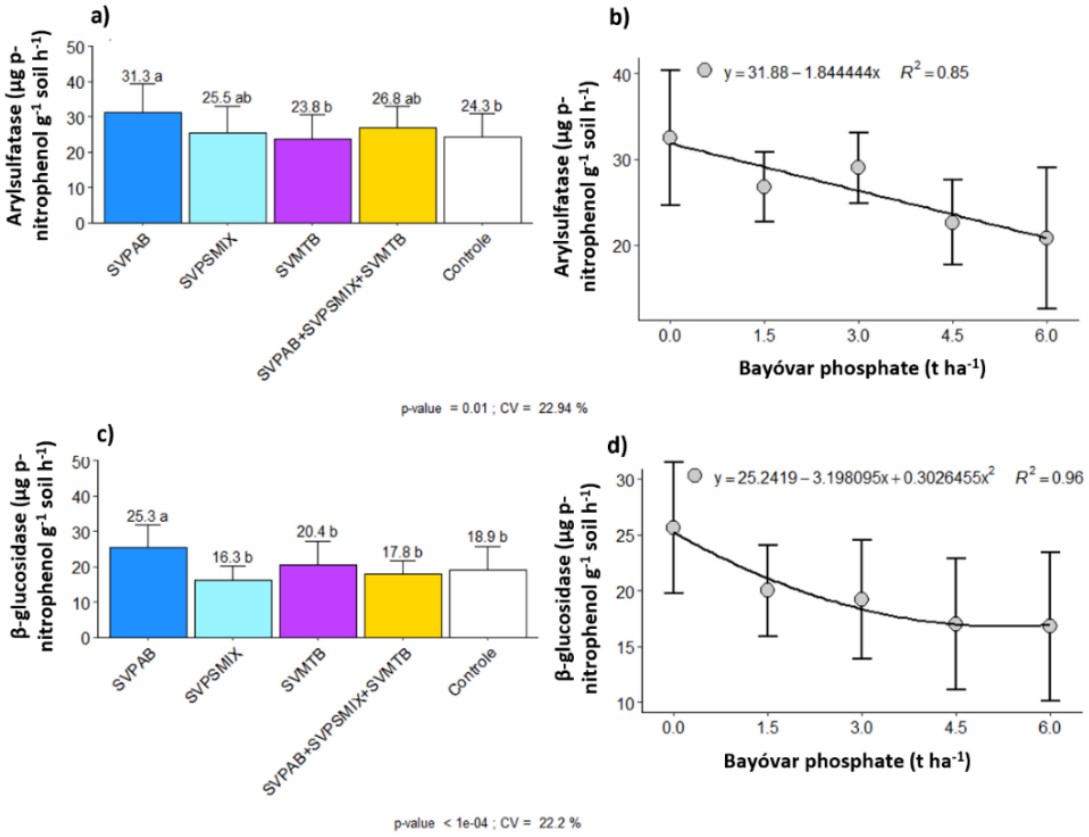


Figure 2. Arylsulfatase (a, b) and β-glucosidase activities (c, d) in *Glycine max* L. plants inoculated with rhizobacteria and subjected to different doses of Bayóvar reactive phosphate. Means followed by the same letter do not differ significantly according to Tukey's test ($p < 0.05$).

The activities of arylsulfatase and β-glucosidase were higher in the rhizosphere of plants inoculated with SVPAB, indicating enhanced microbial activity and greater nutrient mineralization driven by this microbial strain. The observed decline in soil enzyme activity with increasing doses of Bayóvar rock phosphate can be attributed to a reduced need for organic matter mineralization, as higher concentrations of soluble phosphorus become readily available in the soil.

Several studies have shown that microbial activity and enzyme production are not strictly homeostatic in response to nutrient additions, particularly nitrogen and

phosphorus, which can suppress the synthesis of enzymes involved in nutrient acquisition (Wang *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020).

CONCLUSIONS

Microbial inoculation and the application of Bayóvar reactive phosphate significantly influenced the growth and physiological performance of soybean plants. Inoculated plants exhibited greater dry biomass accumulation, while the 6 t ha^{-1} dose of Bayóvar phosphate notably enhanced both plant growth and net photosynthetic rate. Inoculation with the SVPAB strain led to the highest activities of the arylsulfatase and β-glucosidase enzymes, indicating increased microbial-mediated nutrient cycling. These findings suggest that microbial inoculation, in combination with an appropriate dose of Bayóvar reactive phosphate, can optimize soybean development by enhancing nutrient availability and improving physiological efficiency.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the CAPES, and the Foundation for Research Support of the State of Goiás (FAPEG) for the Doctor's grant awarded to Mateus Neri Oliveira Reis. The authors also thank the IFGoiano, Rio Verde campus for the infrastructure and the students involved in the study.

BIBLIOGRAPHY

Amorim, M. B., Tiecher, T., Fontoura, S. M., Fink, J. & Bayer, C. (2025). Phosphorus fertilizer efficiency and phosphorus availability in no-till subtropical Oxisols. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 25*(1), 1089–1104.

Benevides Filho, P. R. R., Blaskowski, A. E., Ramos, M. N., Lessa, L. G. F., Filho, A. N. Z., Abreu-Junior, C. H., Jani, A. D., Capra, G. F. & Nogueira, T. A. R. (2023). Potential soil remineralizers from silicate rock powders (SRP) as alternative sources of nutrients for agricultural production (Amazon Region). *Minerals, 13*(10), 1255.

Chavarria, G., Caverzan, A., Müller, M. & Rakocevic, M. (2017). Soybean architecture plants: From solar radiation interception to crop protection. In *Soybean – The basis of yield, biomass and productivity* (pp. 15–33).

Fan, T., Wang, Y., Wang, M., Wang, S., Wang, X. & Lu, A. (2024). Effect of phosphate rock powder, active minerals, and phosphorus-solubilizing microorganisms on the phosphorus release characteristics of soils in coal mining subsidence areas. *Polish Journal of Environmental Studies, 33*(4). https://doi.org/[coloque_o_DOI_se_disponível]

Favaro, C. P., Klaic, R., Bettiol, W., Ribeiro, C. & Farinas, C. S. (2022). Bio-based composite granules with simultaneous biocontrol and phosphorus fertilization roles: Outcomes from a lab-scale in vitro assessment. *Biotechnology Progress, 38*(3), e3242.

Holz, M., Zarebanadkouki, M., Benard, P., Hoffmann, M. & Dubbert, M. (2024). Root and rhizosphere traits for enhanced water and nutrients uptake efficiency in dynamic environments. *Frontiers in Plant Science, 15*, 1383373.

Jin, K., Chen, G., Yang, Y., Zhang, Z. & Lu, T. (2023). Strategies for manipulating Rubisco and creating photorespiratory bypass to boost C3 photosynthesis: Prospects on modern crop improvement. *Plant, Cell & Environment, 46*(2), 363–378.

Kaur, C., Selvakumar, G. & Upreti, K. K. (2021). Organic acid profiles of phosphate-solubilizing bacterial strains in the presence of different insoluble phosphatic sources. *Journal of Pure and Applied Microbiology, 15*, 1006–1015.

Khan, F., Siddique, A. B., Shabala, S., Zhou, M. & Zhao, C. (2023). Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses. *Plants, 12*(15), 2861.

Monteiro, P. H. R. & da Silva, F. B. (2021). Microbial enzymes and soil health. In *Plant growth-promoting microbes for sustainable biotic and abiotic stress management* (p. 133).

Pintarič, M., Štuhec, A., Tratnik, E. & Langerholc, T. (2024). Specific fertilization practices reveal important insights into the complex interaction between microbes and enzymes in soils of different farming systems. *Life, 14*(12), 1562.

Rawat, P., Das, S., Shankhdhar, D. & Shankhdhar, S. C. (2021). Phosphate-solubilizing microorganisms: Mechanism and their role in phosphate solubilization and uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21*(1), 49–68.

Sarmah, R. & Sarma, A. K. (2023). Phosphate-solubilizing microorganisms: A review. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 54*(10), 1306–1315.

Tabatabai, M. A. (1994). Soil enzymes. In R. W. Weaver, J. S. Angle, & P. S. Bottomley (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 2 – Microbiological and biochemical properties* (Vol. 5, pp. 775–833). Soil Science Society of America.

Wang, S., Mori, T., Mo, J., & Zhang, W. (2020). The responses of carbon- and nitrogen-acquiring enzymes to nitrogen and phosphorus additions in two plantations in southern China. *Journal of Forestry Research, 31*, 1319–1324.

Zhang, C., Zhang, X., Kuzyakov, Y., Wang, H., Fu, X., Yang, Y., Chen, F., Dungait, J. A. J., Green, S. M., & Fang, X. (2020). Responses of C-, N- and P-acquiring hydrolases to P and N fertilizers in a subtropical Chinese fir plantation depend on soil depth. *Applied Soil Ecology, 150*, 103465.

EVALUACIÓN DE ENRAIZADORES EN ESQUEJES DE PITAHAYA ROJA (*Hylocereus undatus*, Haworth, Britton & Rose) EN TEAPA, TABASCO

Eduardo Cipriano Bautista[1]; Román Roberto Vásquez Rendon[1]; Victorino Gómez Valenzuela[1].

[1] Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria Sursureste, 86800, Teapa, Tabasco, México.
Correo del autor de correspondencia: rvasquezr@chapingo.mx

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de cuatro bioestimulantes sobre el enraizamiento y el desarrollo vegetativo de esquejes de pitahaya en condiciones de vivero en Teapa, Tabasco. Los esquejes fueron plantados en bolsas de vivero con una capacidad de 5 litros. Se aplicaron los tratamientos correspondientes utilizando un Diseño Completamente al Azar (DCA), que incluyó 5 tratamientos y 6 repeticiones, sumando un total de 30 unidades experimentales. Esto permitió una evaluación exhaustiva de los efectos de los tratamientos aplicados. Las variables de respuesta evaluadas incluyeron aspectos agronómicos de crecimiento, tales como la longitud de raíces y brotes, así como la cuantificación de la biomasa fresca y seca de brotes y raíces. Los resultados indicaron que hubo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos en las variables longitud de raíces y longitud de brotes, siendo el testigo el que presento los valores más altos. En contraste, no se observaron diferencias significativas en las variables biomasa fresca y seca, sin embargo, se observó que los bioestimulantes aplicados tuvieron un efecto menor en comparación con el testigo.

PALABRAS CLAVE: *Bioestimulantes; crecimiento; enraizamiento.*

INTRODUCCIÓN

La pitahaya (*Hylocereus undatus* Haw) es una fruta exótica que está ganando reconocimiento a nivel mundial, su popularidad se debe a sus características fisicoquímicas, nutricionales y sus compuestos bioactivos considerándosele como un alimento funcional, siendo ampliamente utilizado por sus excelentes características organolépticas y por su valor comercial agregado (Verona-Ruiz *et al.*, 2020).

Se produce en regiones subtropicales y tropicales de América Latina, en estado silvestre se puede encontrar en ciertos países como México, Venezuela, Colombia, Brasil, Costa Rica y Ecuador, además de los países antes nombrados se puede encontrar especies cultivadas de Pitahaya en Bolivia, Panamá, Uruguay, Perú y Vietnam (Santarrosa, 2013).

La pitahaya se propaga por esquejes o semillas, la propagación de pitahaya por esquejes es el método más común, puede permitir, la producción de plantas con características idénticas a la planta madre, además los esquejes alcanzan la producción antes, la limitación del material de esquejes de pitahaya cuando se introduce como un nuevo cultivo ha generado interés en esquejes pequeños para la propagación asexual, por

otro lado, la propagación sexual de pitahaya por semillas es muy importante para los programas de mejoramiento (Elobeidy, 2006). No obstante, el éxito de esta técnica está fuertemente ligado a la capacidad de enraizamiento y al desarrollo inicial de la parte aérea, aspectos que pueden optimizarse mediante la aplicación de bioestimulantes.

Un bioestimulante es una sustancia o microorganismo que se aplica a las plantas para mejorar su eficiencia en la absorción de nutrientes, aumentar su resistencia al estrés abiótico y/o potenciar las características de calidad de los cultivos, sin que su acción dependa de un aporte directo de nutrientes. Además, el término también se refiere a productos comerciales que incluyen combinaciones de estas sustancias y/o microorganismos (du Jardin, 2015). Entre ellos destacan los extractos vegetales que son ricos en fitohormonas, como el extracto de lentejas (*Lens culinaris*) reconocido por su elevado contenido de auxinas, hormonas vegetales que regulan el desarrollo radicular (Alcantara *et al.,* 2019), y el extracto de aloe vera (*Aloe barbadensis*) es famoso por su rica variedad de nutrientes esenciales, que incluyen vitaminas, minerales, aminoácidos y enzimas. Estos componentes son fundamentales para promover un desarrollo saludable de las raíces según Barzola (2024).

Por otro lado, los ácidos húmicos, que se obtienen de la descomposición de materia orgánica, desempeñan un papel importante como acondicionadores del suelo, no solo estimulan el metabolismo celular, sino que también favorecen el crecimiento de las raíces y mejoran la absorción de nutrientes (Canellas et al., 2015). Por otro lado, los enraizadores comerciales como Raíz Plant ® 500 que generan un aumento significativo en la densidad de raíces, permitiendo a las plantas acceder a agua y nutrientes del suelo (Farmagro, 2016).

A pesar de que el uso de bioestimulantes está en aumento para otras especies de importancia agronómica, hay poca información científica sobre su efectividad en el cultivo de pitahaya, especialmente en climas tropicales húmedos como los de Teapa, Tabasco. Por ello, este estudio se propuso evaluar el impacto de cuatro bioestimulantes (extracto de lentejas, extracto de aloe vera, ácidos húmicos y Raíz Plant® 500) en el enraizamiento y desarrollo de esquejes de pitahaya en condiciones de vivero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo entre los meses de noviembre de 2024 y febrero de 2025 en el módulo orgánico de la Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria Sursureste, San José Puyacatengo, Teapa, Tabasco, una región con clima cálido húmedo, donde la temperatura media anual es de 25.5 °C y las precipitaciones superan los 3,000 a 4,000 mm anuales.

Se utilizaron esquejes de pitahaya roja (*Hylocereus undatus*) de 30 cm de longitud, que fueron plantados en bolsas de 5 litros con un sustrato franco compuesto por arena, tierra de vivero y materia orgánica en una proporción de 1:2:1. Los tratamientos incluyeron la aplicación de cuatro bioestimulantes: extracto de lentejas, extracto de aloe vera, ácidos húmicos y el enraizador comercial Raíz Plant® 500. Un grupo de control no recibió ningún tratamiento. Cada esqueje fue sumergido en su respectiva solución durante 15 minutos antes de ser sembrado.

Se evaluaron 4 variables, incluyendo la longitud de raíces, longitud de brotes, la biomasa fresca y seca. Las mediciones se realizaron a los 20, 40, 60, 80 y 100 días. La aplicación de los tratamientos se llevó a cabo en tres ocasiones, con un intervalo de 10 días entre cada una, iniciando a partir del día de siembra. La evaluación del efecto de las condiciones del medio en la producción de brotes vegetativos en la pitahaya y la medición de la biomasa fresca y seca de la raíz se realizó en el día 100 retirando el esqueje de las bolsas y removiendo cuidadosamente el suelo del volumen radicular según lo mencionado en el estudio de Monge-Pérez & Loría-Coto (2022). El diseño del estudio fue completamente al azar, con cinco tratamientos y seis repeticiones, lo que resultó en un total de 30 unidades experimentales, con los resultados se realizó un ANOVA para cada variable evaluada con el paquete estadístico del software R (v2024.04.2+764).

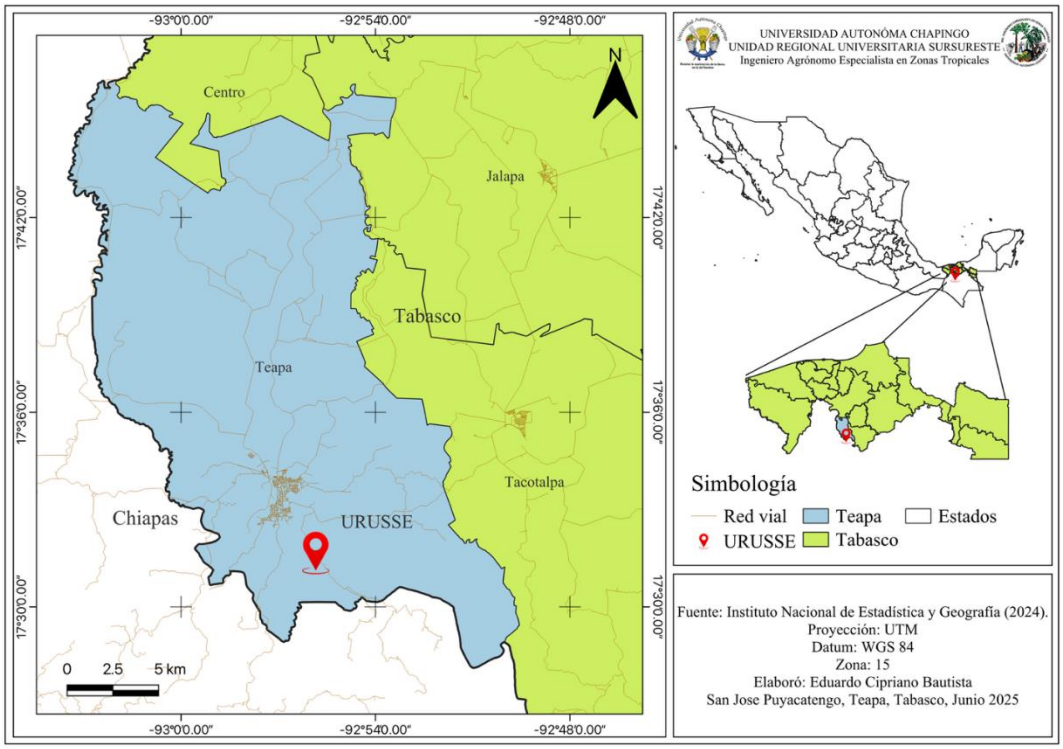


Figura 4. Localización de la URUSSE en el municipio de Teapa, Tabasco, México.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en el análisis de varianza, no se detectaron diferencias estadísticamente significativas ($p>0.05$) entre tratamientos para la mayoría de las variables evaluadas. Sin embargo, se encontraron tendencias y diferencias en los promedios de los datos, lo que mostró que había cambios significativos que son importantes para la agricultura.

El tratamiento testigo (T1) presentó promedios superiores en longitud de brotes y raíces, especialmente hacia el final del experimento, lo que sugiere un crecimiento natural favorable sin necesidad de bioestimulantes. Por otro lado, el tratamiento con Raíz Plant® 500 (T5) mostro consistentemente los valores más bajos en longitud de raíces y brotes, lo

que indica una respuesta limitada en las condiciones evaluadas. Los tratamientos con aloe vera (T3) y ácidos húmicos (T4) tuvieron un desempeño intermedio, mientras que el extracto de lentejas (T2) mostro una tendencia variable (Figura 1 A y B). No se observaron diferencias claras entre los tratamientos en cuanto a la biomasa fresca y seca de los esquejes de *Hylocereus undatus*. Aunque el testigo (T1) mostró valores un poco más altos, estos no fueron lo suficientemente distintos como para considerarlos significativos frente a los tratamientos con bioestimulantes o el enraizador comercial (Figura 1 C y D). En otras palabras, ningún tratamiento logró marcar una ventaja evidente en la acumulación de biomasa bajo las condiciones evaluadas. Aunque los bioestimulantes utilizados poseen propiedades reconocidas en otros cultivos como: chile habanero (*Capsicum chinense),* jitomate *(Sonalum lycopersicum*, corona de Cristo *(Euphorbia milii),* café robusta *(Coffea canephora),* sus efectos sobre los esquejes de pitahaya en las condiciones en Teapa, Tabasco fueron modestos. Estos resultados sugieren la necesidad de seguir explorando ajustes en dosis, frecuencia de aplicación y condiciones ambientales, buscando maximizar su potencial bioestimulante para este cultivo.

Los resultados reportados para el cultivo de pitahaya por Vergara y Caycho (2024), en Perú, demostraron que el uso de bioestimulantes a base de algas marinas favoreció el enraizamiento y crecimiento vegetativo de las estacas de pitahaya. También, otro estudio realizado por Cedeño (2023), en Ecuador, titulado "Respuesta de las varetas de Pitahaya (*Hylocereus undatus*) a tres bioestimulantes y tres dosis a nivel de vivero", concluyó que los tres bioestimulantes evaluados fueron efectivos, cada uno destacando en una variable distinta. Lo que sugiere que algunos bioestimulantes pueden ser efectivos en ciertas condiciones, pero su eficacia no es universal y puede depender de múltiples factores, como el tipo de cultivo, las condiciones ambientales y las prácticas de manejo agrícola.

CONCLUSIONES

La aplicación de bioestimulantes, como el extracto de lentejas, *Aloe vera* y ácidos húmicos, así como el enraizador comercial Raíz Plant® 500, mostró diferencias estadísticamente significativas en las variables longitud de raíces y longitud de brotes. En contraste, no se observaron diferencias estadísticamente significativas en las variables biomasa fresca y biomasa seca, lo que sugiere que estos tratamientos no influyeron de manera determinante en el enraizamiento ni en el desarrollo vegetativo de los esquejes de pitahaya roja en condiciones de vivero. Sin embargo, se notaron tendencias positivas en algunos tratamientos, especialmente en el grupo de control, que destacó en la longitud de raíces y brotes. Estos hallazgos sugieren que el uso de bioestimulantes podría tener efectos específicos que dependen de la concentración o del momento de aplicación, o incluso podría no tener efecto alguno en ciertas condiciones. Por lo tanto, se recomienda llevar a cabo estudios adicionales para optimizar su uso en la propagación vegetativa de la pitahaya.

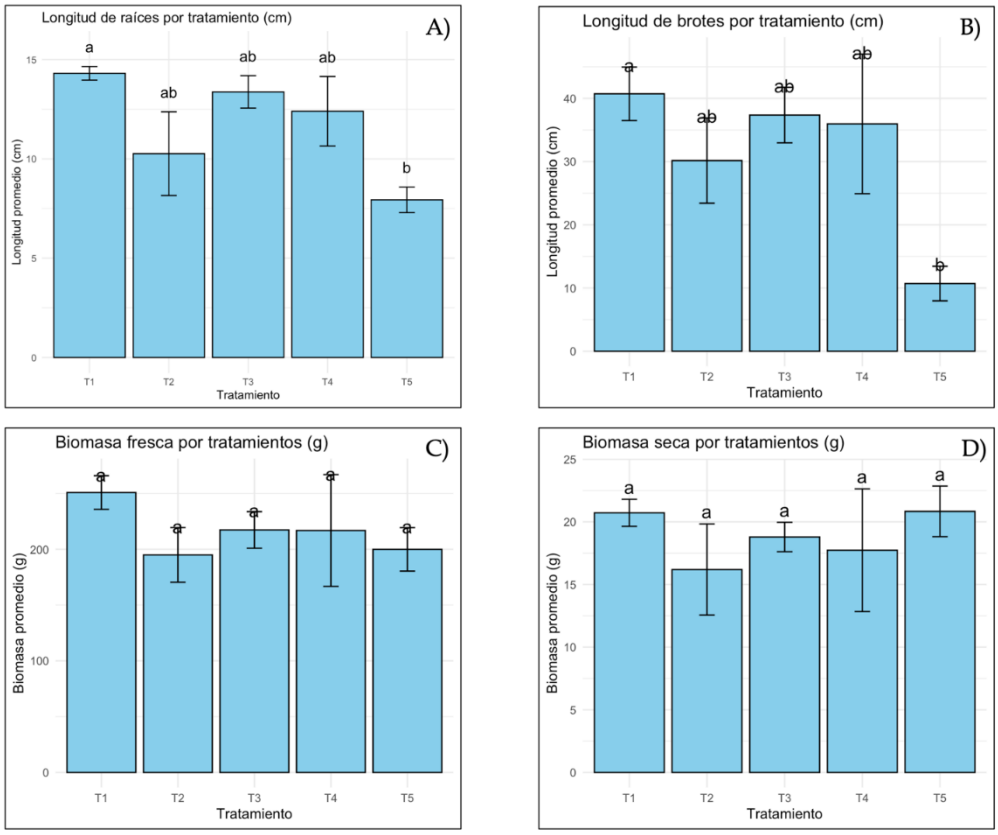


Figura 5. A) Longitud promedio de raíces; B) Longitud promedio de brotes, en esquejes de *Hylocereus undatus* a los 100 días. Se observaron diferencias significativas entre tratamientos, destacando el testigo con los mayores valores y Raíz Plant 500 con los menores. C) muestran la biomasa fresca y D) muestran la biomasa seca, donde no se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos.

Las barras indican la media ± error estándar (n = 6); letras diferentes representan diferencias significativas según Tukey (α = 0.05).

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo por brindar una educación de calidad y gratuita. Esto no sería posible sin el valioso apoyo del pueblo mexicano, cuyo compromiso ha sido esencial para que esta universidad exista y continúe formando a las futuras generaciones.

BIBLIOGRAFÍA

Alcantara, J. S., Acero, J., Alcántara, J. D., Sánchez, R. M., Alcantara, J. S., Acero Godoy, J., Alcántara Cortés, J. D. & Sánchez Mora, R. M. (2019). Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *Nova*, *17*(32), 109-129.

Barzola, B. O. (2024). Evaluación de diferentes enraizantes naturales vs. enraizante inorgánico para propagación vegetativa por esquejes de corona de cristo (*Euphorbia milii*) en Santa Elena Ecuador [Tesis de grado, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Facultad de Ciencias Agrarias Carrera de Agropecuaria]. https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/10908/1/UPSE-TIA-2024-0003.pdf.

Canellas, L. P., Olivares, F. L., Aguiar, N. O., Jones, D. L., Nebbioso, A., Mazzei, P. & Piccolo, A. (2015). Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, *196*, 15-27. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013.

du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, *196*, 3-14. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021.

Elobeidy, A.A. (2006). Mass propagation of pitaya (dragon fruit). *Fruits*, *61*(5), 313-319. https://doi.org/10.1051/fruits:2006030.

García-Cid, F. E., Tapia-Zayago, F. A., Pérez-Ríos, S.R., Madariaga-Navarrete, A., Cenobio-Galindo, A.D.J. & Hernández Soto, I. (2024). Enraizantes a base de lenteja y sábila una alternativa ecológica en la producción de tomate. *Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP*, *10*(20), 10-15. https://doi.org/10.29057/icap.v10i20.12371.

Monge-Pérez, J. E., & Loría-Coto, M. (2022). Pitahaya (Hylocereus sp.) cv. Amarilla: Producción de brotes y relación con variables climáticas. *Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*, *11*(1), 61-79. https://doi.org/10.5377/payds.v11i1.15212.

Santarrosa, V. P. (2013). Evaluación nutricional comparativa de pitahaya (Hylocereus triangularis) deshidratada en deshidratador de bandejas con la liofilizada [Tesis de grado]. Escuela superior Politécnica de Chimborazo.

Verona-Ruiz, A., Urcia-Cerna, J., Paucar-Menacho, L. M., Verona-Ruiz, A., Urcia-Cerna, J. & Paucar-Menacho, L. M. (2020). Pitahaya (*Hylocereus spp.*): Cultivo, características fisicoquímicas, composición nutricional y compuestos bioactivos. *Scientia Agropecuaria*, *11*(3), 439-453. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.16.

EVALUACIÓN DE SUSTRATOS PARA EXPERIMENTOS CON PLANTAS DE SOYA BAJO CONDICIONES CONTROLADAS

Julio César García Rodríguez[12]; María Karina Manzo Valencia[1]; Víctor Olalde Portugal[1]; Silvia Edith Valdés Rodríguez[1]

[1] Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN-Unidad Irapuato, Libramiento Norte km 9.6, Carr. Irapuato-León, Irapuato, Guanajuato, C.P. 36821.
[2] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias-Campo Experimental Las Huastecas, Carr. Tampico-Mante km. 55, Villa Cuauhtémoc, Altamira, Tamaulipas, C.P. 56230.

Correo del autor de correspondencia: silvia.valdes@cinvestav.mx

RESUMEN

Los sustratos juegan un papel crucial en el desarrollo de plantas uniformes, que garanticen la obtención de resultados confiables en experimentos controlados. En este estudio se evaluó el desempeño de diferentes sustratos y la aplicación de dos dosis de fertilización sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de soya bajo condiciones de invernadero. Se utilizó el genotipo H02-2309. Los tratamientos consistieron en combinaciones de arena, limo, "peat moss", tierra de hoja, perlita y vermiculita con aplicaciones de 300 ó 600 mL planta^{-1} semana^{-1} de la solución de Hoagland. Los resultados indicaron que el tratamiento, denominado mezcla general, compuesto por peat moss Sunshine mix 3 (37.5%), tierra de hoja (25%), limo (12.5%), perlita (12.5%) y vermiculita (12.5%) exhibió el mejor desempeño, incrementando el número de hojas, ramas y vainas planta^{-1}. Mientras tanto, no se observaron diferencias entre éste y los tratamientos compuestos por arena-limo (80%) más mezcla general (20%) y arena-limo (80%) más vermiculita (20%) considerando la altura de planta y el diámetro de tallo. Las dosis de fertilización no mostraron diferencias en todas las variables evaluadas. Por lo tanto, la mezcla general permitió el desarrollo de plantas vigorosas y podría utilizarse para estudios donde se requiera suficiente materia vegetal y de buena calidad, tales como análisis bioquímicos y moleculares. Mientras que la combinación de arena-limo (80%) con vermiculita (20%) sería de utilidad para experimentos sobre fenotipificación de la raíz, siempre y cuando se suministre una solución nutritiva adecuada, sugiriéndose la aplicación de 300 mL planta^{-1} semana^{-1} de la solución de Hoagland.

PALABRAS CLAVE: *Crecimiento; fertilización; Glycine max; invernadero; sustratos.*

INTRODUCCIÓN

La obtención de plantas vigorosas de soya [*Glycine max* (L.) Merr.] es un paso crítico para garantizar el éxito de experimentos bajo condiciones controladas. La calidad y uniformidad de las plantas utilizadas en estudios experimentales están fuertemente influenciadas por el sustrato utilizado en trabajos de invernadero. Los sustratos proporcionan soporte físico, retención de agua, aireación y disponibilidad de nutrientes, factores esenciales para una germinación óptima, el desarrollo radicular y el vigor general de las plantas (Gayosso-Rodríguez *et al*., 2018). Los sustratos pueden ser orgánicos como

la composta, turba o fibra de coco, o inorgánicos como la perlita, vermiculita o tezontle, y su combinación permite ajustar propiedades físicas y químicas según los requerimientos del cultivo (Monsalve-Camacho *et al*., 2021).

La evaluación de diferentes composiciones de sustrato permite identificar el medio más adecuado para producir plantas vigorosas y homogéneas, lo cual es importante para minimizar la variabilidad experimental y asegurar evaluaciones fisiológicas o fenotípicas confiables. Además, la elección del sustrato influye en la arquitectura de raíz y en las respuestas al estrés, aspectos cada vez más relevantes en estudios relacionados con condiciones abióticas como la sequía (García-Rodríguez et al., 2024; Morales-Maldonado & Casanova-Lugo, 2015).

Por tanto, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el desempeño de diferentes combinaciones de sustratos en el crecimiento y desarrollo de plantas de soya bajo condiciones de invernadero, con la finalidad de seleccionar el medio más eficiente para generar material experimental de alta calidad. Adicionalmente se consideró la evaluación de dos dosis de fertilización.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo utilizando el genotipo de soya H02-2309 bajo condiciones de invernadero en el CINVESTAV-Unidad Irapuato durante el ciclo primavera-verano 2022. Las semillas se germinaron en bandejas de plástico. Quince días después de la siembra, las plántulas se trasplantaron a macetas de 5 L. La temperatura y humedad relativa promedio fue de 33 °C y 57%, respectivamente. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con cinco repeticiones.

Se evaluaron ocho tratamientos considerando la combinación de diferentes sustratos: 1) mezcla de arena-limo en relación 2:1; 2) vermiculita y 3) una mezcla general compuesta por peat moss Sunshine mix 3 (37.5%), tierra de hoja (25%), limo (12.5%), perlita (12.5%) y vermiculita (12.5%), además de la aplicación de 300 ó 600 mL planta^{-1} semana^{-1} de la solución nutritiva de Hoagland (Hoagland y Arnon, 1950). El Cuadro 1 muestra las combinaciones de los tratamientos. Las plantas se regaron con 200 mL de agua destilada cada tercer día, ajustando el volumen del agua en los días en que se aplicó la solución nutritiva.

A los 65 días después de la siembra se midieron variables relacionadas con el crecimiento y desarrollo de las plantas: altura de planta, diámetro de tallo y número de hojas, ramas y vainas planta^{-1}. Además, se determinó el número de días a inicio de floración. Se realizaron análisis de varianza y para la prueba de comparación de medias se utilizó la prueba LSD con un nivel de confianza del 95%. Todos los procedimientos se realizaron en el programa R 4.5.1. (R Core Team, 2025).

Cuadro 1. Tratamientos evaluados considerando diferentes combinaciones de sustratos más la aplicación de dos dosis de fertilización.

Tratamiento	Dosis de fertilización (mL planta^{-1} semana^{-1})
1. Arena-limo (100%)	300
2. Arena-limo (100%)	600
3. Mezcla general (100%)	300
4. Mezcla general (100%)	600
5. Arena-limo (80%) + mezcla general (20%)	300
6. Arena-limo (80%) + mezcla general (20%)	600
7. Arena-limo (80%) + vermiculita (20%)	300
8. Arena-limo (80%) + vermiculita (20%)	600

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados indicaron que la mezcla general al 100% mostró el mejor desempeño considerando que las plantas produjeron mayor número de hojas, ramas y vainas planta^{-1} en comparación con los otros tratamientos (Figura 1C, D y E, Figura 2). Lo cual se debió, probablemente, a que los sustratos de tipo orgánico son ricos en nutrientes de liberación lenta y poseen una mayor capacidad de intercambio catiónico (Gruda, 2012). Esto permite que las raíces absorban los nutrientes más eficientemente, favoreciendo el crecimiento sostenido de las plantas. Curiosamente, este sustrato también modificó la fenología del cultivo, ya que las plantas llegaron a floración más temprano que los otros tratamientos (Figura 1F). De manera similar, otros estudios han reportado que el uso de sustratos orgánicos, como la fibra de coco, incrementó significativamente el número de hojas, el área foliar y la materia seca en plantas de soya (de Souza *et al*., 2021).

Por lo tanto, la mezcla general al 100% podría utilizarse en experimentos donde se requieran plantas con follaje vigoroso, que aporten suficiente material vegetal para análisis bioquímicos o moleculares. Cuando el objetivo sea conocer el potencial agronómico de genotipos de soya bajo condiciones controladas. O cuando se deseen plantas con óptimo desarrollo para cruzamientos en programas de mejoramiento genético, especialmente mediante selección asistida por marcadores moleculares.

Sin embargo, en características como altura de la planta y diámetro de tallo no se observaron diferencias significativas entre la mezcla general al 100% y los tratamientos compuestos por arena-limo (80%) y mezcla general (20%), y arena-limo (80%) y vermiculita (80%) (Figura 1A y B, Figura 2). La mezcla general, por el origen de sus componentes, se adhiere fácilmente a la superficie de las raíces, dificultando su lavado. Por consiguiente, se sugiere que el sustrato arena-limo (80%) y vermiculita (20%) podría utilizarse en experimentos relacionados con la fenotipificación de la raíz, siempre y cuando vaya acompañado con aplicaciones de una solución nutritiva, ya que esto reduciría considerablemente el tiempo de lavado de las raíces y el daño provocado cuando se utilizan otro tipo de sustratos. En otros reportes se ha sugerido que los sustratos a base de arena son económicos, presentan buen drenaje y aireación, permitiendo un desarrollo saludable de las raíces (Moncayo-Luján *et al*., 2023).

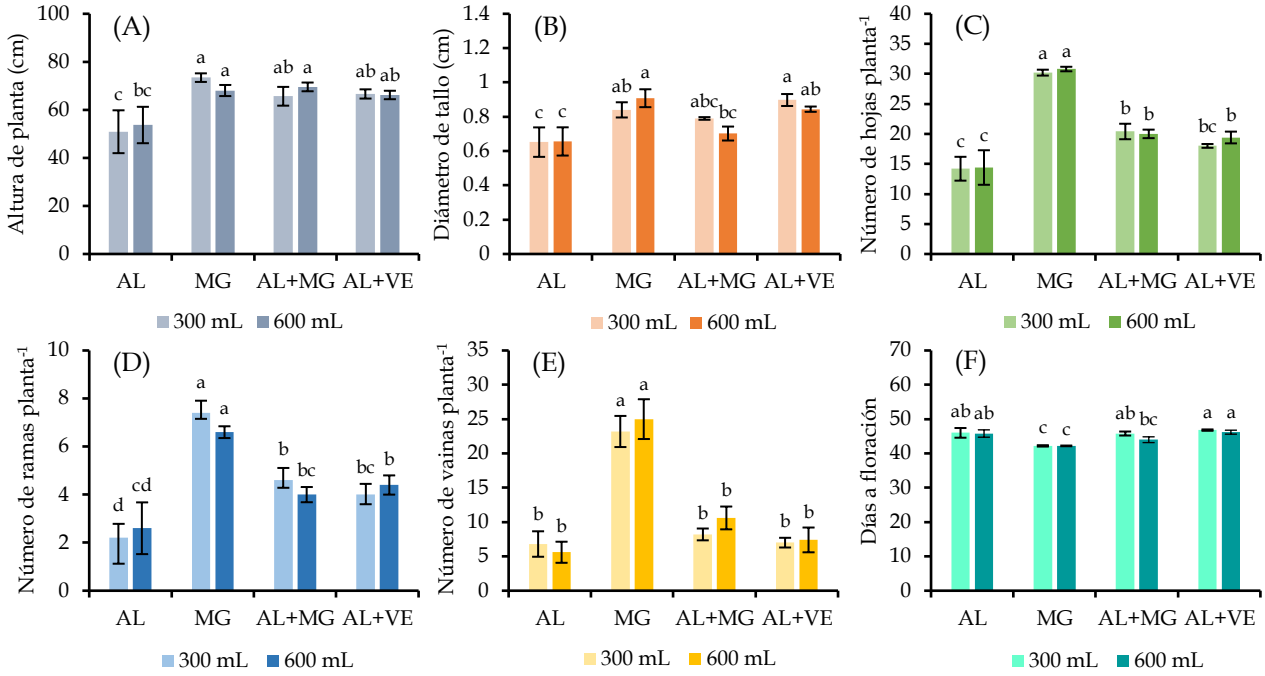


Figura 1. Desempeño de diferentes sustratos en combinación con dos dosis de fertilización sobre el crecimiento y desarrollo de plantas de soya bajo condiciones de invernadero.

Las barras que comparten la misma letra no presentan diferencias (LSD, $p \leq 0.05$). AL = Arena-limo (100%); MG = Mezcal general (100%); AL+MG = Arena-limo (80%) + mezcla general (20%); AL+VE = Arena-limo (80%) + vermiculita (20%). Las dosis de 300 y 600 corresponden a mL planta^{-1} semana^{-1}.

Cabe señalar que el tratamiento arena-limo al 100% mostró el peor desempeño sobre el crecimiento de las plantas (Figura 1A-E, Figura 2). Adicionalmente, no se observaron diferencias significativas entre las dosis de fertilización evaluadas. Por lo que, para efectos de reducir costos, podría recomendarse el uso de 300 mL planta^{-1} semana^{-1} de la solución de Hoagland, distribuyendo la aplicación en 100 mL planta^{-1} cada tercer día.

CONCLUSIONES

La mezcla general al 100% presentó las mejores condiciones para el crecimiento y desarrollo de las plantas de soya bajo condiciones de invernadero y podría utilizarse para estudios que requieran suficiente materia vegetal y de buena calidad. Por otro lado, el sustrato compuesto por arena-limo (80%) y vermiculita (20%) podría considerarse para experimentos relacionados con la caracterización de las raíces.



Figura 2. Desarrollo de las plantas a los 50 días después de la siembra. Los tratamientos 3 y 4 (mezcla general al 100%) mostraron un mayor número de hojas, ramas y vainas planta^{-1} a los 65 días después de la siembra, pero en altura y diámetro de tallo fueron similares a los tratamientos 5, 6, 7 y 8, que involucraron una mayor proporción de arena. El número corresponde a los tratamientos enunciados en el Cuadro 1.

BIBLIOGRAFÍA

de Souza, S.J., Oliveira, M.J., Rafael Santiago, C.R., Fernandes, O. A., de Melo B.M. & Oliveira, M. R. (2021). Development of soybean plants using a substrate based on green coconut fiber. *Agronomía Colombiana*, 39: 47-58. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v39n1.91203.

García-Rodríguez, J.C., Manzo-Valencia, M. K., Olalde-Portugal, V. & Valdés-Rodríguez, S.E. (2024). Exploring drought responses in Mexican soybeans: plant water status, shoot and root biomass, and root system architecture. *Food and Energy Security*, 13(6), e70017. https://doi.org/10.1002/fes3.70017.

Gayosso-Rodríguez, S., Borges-Gómez, L., Villanueva-Couoh, E., Estrada-Botello, M.A. & Garruña, R. (2018). Caracterización física y química de materiales orgánicos para sustratos agrícolas. *Agrociencia*, 52: 639–652.

Gruda, N. (2012). Current and future perspective of growing media in Europe. *Acta Horticulturae*, 960: 37-44. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.960.3.

Hoagland, D.R. & Arnon, D.I. (1950). The water-culture method for growing plants without soil. California Agricultural Experiment Station, 347. https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19500302257

Moncayo-Luján, M.R., Ramírez-Aragón, M. G., Ortíz-Escobar, T. B. & Guzmán-Silos, T.L. (2023). Influencia de sustratos de arena y soluciones orgánicas en la concentración de compuestos fenólicos de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) extraídos con solventes orgánicos. *Investigación y Ciencia*, 31: 1-7.

Monsalve Camacho, O. I., Henao Toro, M. C. & Gutiérrez Díaz, J. S. (2021). Caracterización de materiales con uso potencial como sustratos en sistemas de cultivo sin suelo. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 22(1). https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1977.

Morales-Maldonado, E.R. & Casanova-Lugo, F. (2015). Mezclas de sustratos orgánicos e inorgánicos, tamaño de partícula y proporción. *Agronomía Mesoamericana*, 26: 365–372. https://doi.org/10.15517/am.v26i2.19331.

R Core Team (2025). R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

FERTILIDAD DEL SUELO Y DESARROLLO DEL BANANO VARIEDAD "PIÑA" CULTIVADO EN SISTEMA ORGÁNICO

Gamaliel Velázquez Ovalle[1]; María de Lourdes Adriano Anaya[1]; Miguel Salvador Adriano[1]; Isidro Ovando Medina[1]; Miguel Salvador Figueroa[1]

[1] Instituto de Biociencias, Universidad Autónoma de Chiapas, Blvd. Príncipe Akishino S/N, Solidaridad 2000, Tapachula de Córdoba y Ordoñez, Chiapas. C.P. 30798.

Correo del autor de correspondencia: miguel.salvador@unach.mx

RESUMEN

Por sus caractrízticas organolépticas, el banano variedad "Piña" es altamente aprciado en el Soconusco, Chiapas, México y la información para su cultivo es escasa. Por lo anterior, el objetivo del trabajo fue determinar el efecto del biol sobre la fertilidad del suelo y el desarrollo del banano variedad "Piña". Se utilizaron dos tratamientos (1) 5 kg planta^{-1} de compost + 2 L planta^{-1} de biol y (2) 5 kg planta^{-1} de compost + 4 L planta^{-1} de biol. El compost fue aplicado cada 56 días y el biol cada 7 días. Durante todo el desarrollo de las plantas se determinó, en suelo, materia orgánica, nitrógeno total, N-NO^{-3}, Ca^{+2}, K^{+}, Na^{+}, pH y conductividad y, en planta, altura, diámetro, cantidad de hojas y grado de nutrición. Los resultados mostraron que los parámetros del suelo fueron similares, mientras que los parámetros de la planta mostraron mejor desarrollo en los del tratamiento 2.

PALABRAS CLAVE: *Abonos; biol, compost; fertilización.*

INTRODUCCIÓN

Entre las diferentes variedades de bananos producidos en la región Soconusco de Chiapas, México, la variedad "Piña" destaca por sus características sensoriales *sui generis*. Aunque de origen geográfico y genético desconocido, esta variedad es ampliamente apreciada en la región, razón por la cual se ha establecido la cadena de producción y de comercialización con parámetros cuantitativos desconocidos. La agrotecnia utilizada por los productores de banano "Piña" es similar a la del banano clon "Gran Enano", es decir, la adición de (ha^{-1} ciclo^{-1}): 200 - 490 kg de N, 400-860 kg de K_2O, 72-80 kg de P_2O_5, cantidades variables de elementos menores, control de flora acompañante con herbicidas químicos y pesticidas químicos para controlar las enfermedades. El cultivo requiere suelos profundos, con textura franco y estructura que permitan un buen drenaje, con valores de pH de 6.8 a 8.1 (Reyes-Pallazhco *et al.*, 2018). La calidad del suelo es afectada por las actividades humanas (Muñoz *et al.*, 2018), lo que ha ocasionado pérdida de estructura, capacidad de retención hídrica, pérdida de diversidad microbiana y deterioro en general. Por lo anterior se ha considerado el empleo de biofertilizantes como alternativa para restablecer la fertilidad de los suelos bananeros (Adriano *et al.*, 2015), por lo cual el objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto del biol sobre la fertilidad del suelo y el desarrollo del banano variedad "Piña".

MATERIALES Y MÉTODOS

Área del estudio. El estudio se realizó en la Estancia Agroecología "AYOL" del municipio de Tapachula, Chiapas, México (14° 49´ 48.56´´N; 92° 17´ 46.98´´O; 58 msnm; 2653 mm de precipitación anual; 26.5 °C y 78% promedio de temperatura y humedad relativa).
Biofertilizantes. Los biofertilizantes (compost y biol) fueron preparados de acuerdo a lo descrito por Molina *et al.* (2015). Después de la maduración de los biofertilizantes el contenido de nitrógeno (método Kjeldahl, NOM-021-RECNAT-2000) fue 1.74 g kg^{-1} para el compost y 1.59 g L^{-1} del biol.
Establecimiento del cultivo de banano variedad "Piña" y mantenimiento. El cultivo fue establecido con hijuelos (44) tipo "espada" de 2 meses de edad, sembrados con distancia de 3 m entre planta y 3 m entre surcos (cuatro surcos con 11 plantas cada uno). El compost, 5 kg $planta^{-1}$, fue aplicado a 20 cm del pseudotallo cada 56 días. El control de la Sigatoka Negra fue realizado mediante aspersión foliar, cada 7 días, de extracto de ajo y clavo (Adriano *et al.,* 2022).
Tratamientos. Se establecieron dos tratamientos, variando la cantidad de biol, dos y cuatro litros por planta, aplicados cada 7 días, a 20 cm del pseudotallo.
Variables agronómicas analizadas. Las variables agronómicas altura del pseudotallo (desde el nivel del suelo hasta la intersección de las últimas dos hojas emitidas por la planta), perímetro del pseudotallo: (a 5 cm sobre el nivel del suelo), número de hojas funcionales y estado de nutrición (Unidades SPAD, Minolta SPAD 502), fueron determinadas cada 14 días hasta que alguna planta inició el florecimiento.
Parámetros del suelo. Los parámetros del suelo fueron determinados cada 56 días empleando muestras compuestas del suelo de cada tratamiento. Se les determinó materia orgánica (MO), nitrógeno total (NT), $N\text{-}NO^{-3}$, Ca^{+2}, K^{+}, Na^{+}, pH y conductividad eléctrica (CE). La MO, NT, pH y CE, fueron realizadas de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT- 2000. El $N\text{-}NO^{-3}$, Ca^{+2}, K^{+}, Na^{+} fueron analizados con electrodos (HORIBA) en extractos acuoso 1:10 (P/V)
Análisis de resultados. El valor promedio de cada variable, fue utilizado para realizar la comparación entre tratamientos mediante *t-student*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los Cuadros 1 y 2 se muestran los valores de los distintos parámetros del suelo, determinados en este trabajo. Lo destacable es que en el suelo con la mayor cantidad de biol utilizado (4 L cada 7 días) los valores de todos los parámetros fueron superiores a lo encontrado en el suelo donde se empleó menor cantidad de este compuesto. Los valores obtenidos en el presente trabajo fueron similares a lo reportado previamente por Adriano *et al.* (2012) en banano y Quiroz *et al.* (2013) en chile piquín. Al suministrar biofertilizantes a las plantas, además de ser una fuente orgánica de nutrientes, se estimula la actividad microbiana edáfica, lo que incrementa la biodisponibilidad de nutrientes, y estimula el desarrollo de las plantas (Valverde *et al.,* 2010). De acuerdo a los valores especificados en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT- 2000, la fertilidad del suelo estuvo en el rango "muy alto" para nitrógeno total (> 60 mg kg^{-1}), "alta" para K^{+} (> 0.6 cM kg^{-1}),

materia orgánica medio (>16.1%), sodio (> 1.02 cM kg^{-1}), Ca (> 10.0 cM kg^{-1}), CE "moderadamente salino" (2.1 -4.0 dS m^{-1}) y "moderadamente acido" para el pH (6.6 - 7.3).

Por su parte, en la Figura 1 se muestra la dinámica de los parámetros perímetro de pseudotallo, altura de planta, cantidad de hojas funcionales y nivel de nutrición (SPAD) de las plantas de banano variedad "Piña" cultivadas con cantidades diferenciales de biol. La altura de la planta muestra que el máximo tamaño fue alcanzado después de 172 días de iniciado el trabajo y con forma sigmoidea.

El crecimiento tuvo tres fases: la primera de ellas, con duración de 42 días, denominada etapa de plántula (Torrado-Jaime y Castaño-Zapata, 2008) y sin diferencia estadística entre los tratamientos; la segunda fase de rápido crecimiento con duración de 96 y 84 días para las plantas del Tratamiento 1 (T1) y Tratamiento 2 (T2) respectivamente, con marcada diferencia estadística y conocida como etapa de pre-florecimiento (Torrado-Jaime y Castaño-Zapata, 2008) y una etapa final de crecimiento lento con duración de 42 días para las plantas del T1 y 56 para las plantas del T2, sin ninguna denominación y sin diferencia estadística entre los tratamientos. La altura promedio de las plantas del T2 fue 349 cm y la del T1 fue 328 cm. Las primeras plantas en alcanzar la fase de florecimiento fueron las del T2. Tanto la altura máxima de las plantas como la duración de la etapa de plántula estuvieron dentro del rango reportado para plátanos de las variedades "África", "Dominico Hartón", FHIA-20 y FHIA-21 (Torrado-Jaime y Castaño-Zapata, 2008); sin embargo, el tiempo invertido en la fase de pre-florecimiento fue la mitad de lo reportado para esas mismas variedades. Por su parte, Martínez y Cayón (2011) reportaron que los bananos de las variedades "Gran Enano" y "Valery" alcanzaron la etapa de florecimiento 173 y 191 días después de la siembra. Las diferencias claramente están asociadas a la variedad empleada. Por lo anterior, la diferencia encontrada entre las plantas de los dos tratamientos puede deberse a la cantidad de nitrógeno adicionado, aunque es posible que estuviese influenciada por los demás componentes del biol.

Cuadro 1. Valores de los diferentes parámetros del suelo cultivado con banano variedad "Piña" con aplicación diferencial de biol. T1 = 2 L $planta^{-1}$; T2 = 4L $planta^{-1}$. DDIB = Días después de iniciado el proceso de biofertilización.

DDIB	pH		CE (µS cm^{-1})		Na (ppm)		K (ppm)		Ca (ppm)	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
28	6.1	6.2	276.5	320.5	2250	3033	1510	1283	1700	2283
56	6.2	6.2	256.2	246.3	1933	1933	1133	1633	2117	1633
84	6.4	6.5	326.5	340.2	1733	1483	1185	1483	2533	2483
112	6.2	6.4	280.3	276.2	1418	2867	1040	1483	2350	2483
140	6.3	6.2	250.5	231.3	2433	2666	1550	1733	2033	2233
168	6.3	6.1	265.0	256.2	2140	2543	1628	1459	1934	2564
196	6.2	6.3	243.5	264.8	2234	2678	1167	1356	2034	2378
Promedio	6.2	6.3	271.2	276.5	2020	2458	1316	1490.0	2100	2294
DE	0.1	0.1	25.7	36.8	324	510	220	142.1	253	291

Cuadro 2. Valores de los diferentes parámetros del suelo cultivado con banano variedad "Piña" con aplicación diferencial de biol. T1 = 2 L planta^{-1}; T2 = 4L planta^{-1}. DDIB = Días después de iniciado el proceso de biofertilización.

DDIB	NO_3 (ppm)		P (ppm)		MO (%)		NT (%)	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
28	967	983	0.03	0.02	6.2	6.3	0.36	0.36
56	975	940	0.04	0.05	6.1	6.7	0.44	0.42
84	980	1060	0.04	0.04	6.3	6.4	0.43	0.49
112	975	1110	0.07	0.08	6.4	6.5	0.40	0.45
140	970	1032	0.06	0.11	6.4	6.6	0.38	0.44
168	921	1098	0.05	0.11	6.5	6.7	0.35	0.42
196	932	1102	0.06	0.13	6.4	6.6	0.37	0.43
Promedio	960	1046	0.05	0.08	6.3	6.5	0.39	0.43
DE	21	60	0.01	0.04	0.1	0.1	0.03	0.04

La dinámica del perímetro del pseudotallo fue similar a la altura de la planta, aunque, con mayor diferencia entre los tratamientos. La ganancia mostró tres fases: una primera fase, con duración coincidente con la etapa de plántula (42 días) y sin diferencia estadística entre los tratamientos, la segunda fase con duración de 84 días, coincidente únicamente con la etapa de pre-florecimiento de las plantas del T2, y diferencia estadística entre ellos, y una etapa de estabilidad, duración de 70 días con diferencia estadística entre los tratamientos. La variable perímetro, o diámetro, del pseuedotallo de las musáceas no ha sido objeto de atención en los trabajos de investigación por lo que la información disponible es escasa. En ese sentido, el perímetro del pseudotallo de las plantas de banano empleadas en este trabajo fue mayor a lo reportado por Torrado-Jaime y Castaño-Zapata (2008) para plátanos de las variedades "África", "Dominico Hartón", FHIA-20 y FHIA-21. Los resultados de este trabajo orientan a pensar en que el perímetro del pseudotallo es una variable que permite detectar diferencias en la disponibilidad de nutrientes en el suelo.

La cantidad máxima de hojas funcionales (14.75 hojas planta^{-1}) en las plantas fue observada a los 98 días, sin diferencias estadísticas entre los tratamientos. Posteriormente tal variable disminuyó hasta alcanzar un valor cuasi-constante, 10.8 hojas planta^{-1}, durante los últimos 84 días. La disminución de la cantidad de hojas fue resultado de la presencia de enfermedad, Sigatoka Negra. La cantidad de hojas funcionales, a florecimiento, del banano variedad "Piña" fue similar a lo reportado para plátanos de las variedades "África", "Dominico Hartón", FHIA-20 y FHIA-21 (Torrado-Jaime y Castaño-Zapata, 2008) en banano de la variedad "Williams" (Torres-Bazurto *et al.,* 2019; Mostafa, 2005), y el banano variedad "Gran Enano" (Soto, 1991).

Finalmente, el estado nutricio de las plantas, expresado como valor SPAD en la hoja 4, para ambos tratamientos estuvo en el rango de 50 – 61, sin diferencia estadística y sin variaciones a lo largo del tiempo. La estabilidad de esta variable indica que ambas estrategias de biofertilización proveen la cantidad de nutrimentos requeridos por la variedad de banano objeto de este trabajo.

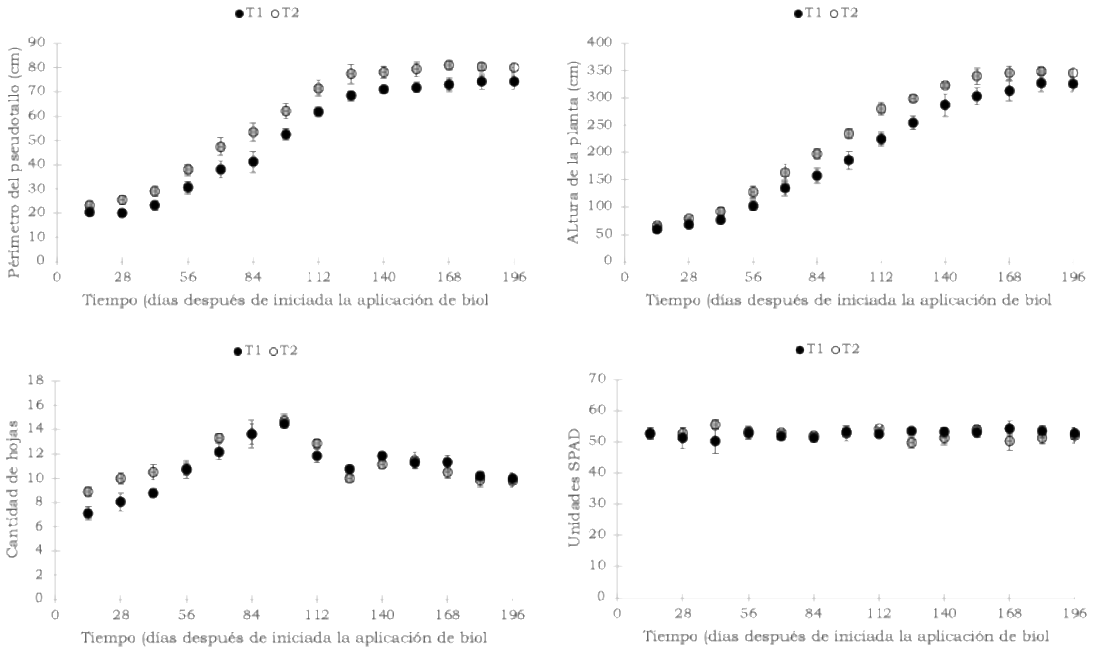


Figura 1. Dinámica del desarrollo de las plantas de banano variedad "Piña" cultivadas con la adición de diferentes cantidades de biol. T1 = 2 L planta^{-1}; T2 = 4 L planta^{-1}.

CONCLUSIÓN

Los parámetros materia orgánica, nitrógeno total, N-NO^{-3}, Ca^{+2}, K^{+}, Na^{+}, pH y conductividad eléctrica en suelos cultivados con banano variedad "Piña" no fueron significativamente diferentes al emplear 2 L planta^{-1} o 4 L planta^{-1} de biol, sin embargo, este último mejoró todos los parámetros biológicos de dicha planta.

BIBLIOGRAFÍA

Adriano-Anaya, L., Matías-Castillo, M., Moreno-Castillo, S., Vázquez-Ovando, A. & Salvador-Figueroa, M. (2022). Mixture of clove (*Sysygium aromaticum*) and garlic (*Allium sativum*) alcoholic extracts in the control of black Sigatoka in 'Macho' plantain. *Revista Mexicana de FitopatologíA (En LíNea)/Revista Mexicana de FitopatologíA*. https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2207-3.

Adriano, M.L., Gutierrez, F., Dendooven, L. & Salvador, M. (2012). Influence of compost and liquid bioferment on the chemical and biological characteristics of soil cultivated with banana (Musa spp. L.) Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 12(1):33-43.

Adriano-Anaya, M.L. & Salvador-Figueroa, M. (2015). Producción sustentable de Banano. 1ª. Edición. Ed. Fray Bartolomé De Las Casas, A.C. Chiapas, México. 96Pp.

Martínez, A.M. & Cayón, D.G. (2011). Dinámica del Crecimiento y Desarrollo del Banano (*Musa* AAA Simmonds cv.Gran Enano y Valery). Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. 2: 2-11.

Molina, M.P., Flores, H., Velázquez, G., Adriano, O., Ovando, A., Salvador, F. (2015). Biofertilización y Microbiota del suelo en plantaciones establecidas de banano clon "Gran Enano" (Musa AAA). *En:* Adriano A.M. & M. Salvador F. (eds). Producción sustentable de Banano 1ª. Edición. Ed. Fray Bartolomé de las Casas.

Quiróz-Márquez, C., López-Espinosa, S., Cano-Ríos, P. & Moreno-Reséndez, A. (2013). Fertilización orgánica: Una alternativa para la producción de chile piquín bajo condiciones protegidas. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 19(1). DOI: 10.5154/r.rchsh.2012.12.072.

Mostafa, E.A.M. (2005). Response of Williams's banana to different rates of nitrogen and potassium fertilizers. *Journal Applied Science Research,* 1: 67-71.

Muñoz-Rojas, M. (2018). Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 5 :47-52. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.007.

Soto, M. (1991). BANANOS, cultivo y comercialización. 3ª. Edición. Litografía e Imprenta LIL, S.A. (Ed). Costa Rica, 200-237 pp.

Torrado-Jaime, M., & Castaño-Zapata, J. (2008). Incidencia y severidad de las Sigatokas Negra (*Mycosphaerella fijiensis Morelet*) y amarilla (*Mycosphaerella musicola* Leach et Mulder) del plátano según los estados fenológicos. *Agronomía Colombiana*, 26: 435-442.

Torres-Bazurto, J., Magnitskiy, S. & Sánchez, J.D. (2019). Effect of fertilization with N on height, number of leaves, and leaf area in banana (*Musa* AAA Simmonds, cv. Williams). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas,* 13: 9-17.

Reyes-Pallazhco, J., León-Cabrera, P., Barrezueta-Unda, S. (2023). Respuesta del cultivo de banano a diferentes proporciones de microorganismos y biochar en dos texturas de suelo. *Manglar*, 20(2):109-115.

Valverde Fonseca, Edgar Lenin, García Batista, Rigoberto Miguel, Moreno Herrera, Alexander, Socorro Castro Alejandro Rafael (2019). Alternativas nutricionales eficientes en banano orgánico en la provincia el Oro, Ecuador. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas,* 2(1):151-159. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=721778098021.

ISOLATION AND CHARACTERISATION OF BACTERIA WITH PGPR POTENTIAL IN SEMI-TILLAGE CONDITIONED SOILS

Rebeca Corona Teyssier[1]; Karina Cante Salinas[1]; Fernando López Valdez[2]; Laura J. García Barrera[2]; Mariana Miranda Arámbula[2].

[1] Unidad Prof. Interdisciplinaria de Ingeniería, Campus Tlaxcala (UPIIT – IPN). Tlaxcala, 90000. Mexico.
[2] Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada (CIBA – IPN). Tlaxcala, 90700. Mexico.

Corresponding author: mmirandaa@ipn.mx

ABSTRACT

Agricultural production faces challenges, including climate change and declining soil fertility. Therefore, the study of endemic microorganisms with plant growth-promoting potential is a sustainable alternative to conventional agrochemicals. In this study, 11 strains with the potential to promote plant growth were identified. These were obtained from an agricultural plot conditioned for semi-tillage without the application of agrochemicals for five consecutive cycles in the vicinity of the Atoyac River, Tlaxcala, Mexico. Two strains stood out with germination and radicle elongation rates higher than the control, leaving open the possibility of conducting studies in protected crops and molecular identification.

KEYWORDS: *Conditioned soil; Isolate strains; Potential PGPMs; Rhizobacteria; Soil bacteria.*

INTRODUCTION

Currently, agricultural production is under pressure from environmental challenges such as climate change, the indiscriminate use of agrochemicals, the exploitation of continuous agricultural cycles, irrigation with wastewater (in some cases with 'hard' water and/or content of heavy metals over Official Norm's limits), in general, poor agricultural soil management and conservation practices (Sayta *et al*., 2025; Narayanan and Ma. 2024). In addition, 8.7% of the world's arable land has already been classified as saline and acidic soil, losing much of its fertility, with 1.5 million hectares affected each year (Gou *et al*., 2025). These conditions have affected microorganisms such as fungi and bacteria that play a crucial role in agricultural soil fertility (Laishram *et al*., 2025) and are considered beneficial microorganisms because they protect plants from pathogens, improve nutrient absorption, promote plant growth, and increase agricultural yields, among others. These microorganisms are known as Plant Growth-Promoting Microorganisms (PGPMs) (Laishram *et al*., 2025; Narayanan and Ma., 2024). And according to the international sustainable development goals (SDGs) signed by our country until 2030, the objectives 'Life on land (15)', 'Climate action (13)', 'Responsible consumption and production (12)' and others can be covered with proposals that consider the microorganisms endemic to each region and their potential as Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR). Therefore, our working group established the isolation and study of bacteria with PGPR potential in semi-tilled agricultural soil for five

continuous cycles in the vicinity of the Atoyac River (a tributary contaminated by industrial, domestic and agricultural discharges).

MATERIALS AND METHODS

The study was conducted on a 28 × 30 m plot (approx. 840 m^2) of rainfed land with semi-no-till crop rotation without the application of agrochemicals for five continuous rainfed agricultural cycles (beans, corn, broad beans, corn, and broad beans) in the vicinity of the Atoyac River, in the municipality of Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, Mexico. Due to the nature of the proposal, it was divided into two stages: *a) Isolation and purification of bacteria with potential PGPR*, and *b) Preliminary trials of potential PGPM strains on tomato seeds* (*Solanum lycopersicum* var. *lycopersicum*) *under controlled conditions*.

a) Isolation and purification of bacteria with potential PGPR. Ten points were randomly selected on the agricultural plot to take samples of 20 g each, which were then combined to obtain a homogeneous soil mixture. Subsequently, 10 samples of 1 g each were taken, and 9 mL of sterile distilled water per sample was added to a container, which was shaken vigorously, and the supernatant was filtered with Whatman membranes (No. 4, 20-25 µm). Next, one mL was placed in a tube, and a series of dilutions (10^{-2} to 10^{-6}) was performed for each sample. One millilitre (per sample) was inoculated into a Petri dish with selective media for PGPR (N fixed bacteria: NFB; National Botanical Research Institute's Phosphate, NBRIP, etc.), following the conventional technique protocol, in chambers at 30 °C for 12 to 72 h. The colonies that grew in the selective media were monitored, recovered, and reseeded for isolation and purification for subsequent taxonomic identification. Approximately 78 strains were obtained, of which 48 isolates were phosphorous solubilisers, 11 isolates were nitrogen fixers, and 9 isolates were phosphorus solubilises. Of these isolates, 39 grew on more than one selective medium and, based on arbitrary criteria for priority 1, 2, and 3 (priority 1 being isolates that grew on NFB-Siderophores selective media for PGPM), 11 strains were selected for preliminary trials on tomato seeds under controlled conditions.

b) Preliminary trials of potential PGPM strains on tomato seeds (*Solanum lycopersicum* var. *lycopersicum*) under controlled conditions. Eleven isolates of bacteria with potential PGPR were selected and inoculated in nutritive broth under constant agitation (250 rpm). They were kept growing overnight at 30 °C at 70% RH, and aliquots were obtained with the bacteria at a concentration of 1×10^8 CFU · mL^{-1} (McFarland scale) for the bioassays of the tomato culture and the selected bacteria. A layer of sterile filter paper was placed in sterile Petri dishes and moistened with 5 mL of sterile distilled water. Ten tomato seeds (disinfected with 5% hypochlorite) were placed in each dish and inoculated with 5 mL of bacterial suspension under constant agitation (250 rpm) at room temperature for 30 minutes. The seeds were then transferred to sterile Petri dishes with moist sterile paper towels, the dishes were sealed and labelled and kept in growth chambers with controlled environmental conditions (30 °C, 70% RH, darkness) for 7 days (Zahid *et al*., 2015). Five seeds were used for treatment and carried out for triplicate, where the variables were number of germinated seeds and root length.

Effect on tomato seed germination and root stimulation. Eleven best strains (isolated and purified using qualitative criteria) were selected that tested positive on selective media as potassium solubilises, nitrogen fixers and phosphorus solubilises (Pikosvkaya, NFB, NBRIP, and NFB- Siderophores). Their effect on germination (germination index expressed as a percentage, Figure 1) and their effect on radicle length were determined according to the report by Meza-Zamora (2019).

$$GI = \left(\frac{No.\,germinated\ seeds\ sample}{No.\,germinated\ seeds\ control}\right)\left(\frac{Sample\ root\ length}{Control\ root\ length}\right) \times 100$$

Figure 1. Formula for determining germination index (GI, %) according to Meza-Zamora (2019).

Analysis of results. Results were analyzed via analysis of variance in an unbalanced completely randomized design, using PROC UNIVARIATE & GLM of SAS software (SAS System, ver. 9.0, SAS Institute), at a significance level of $p \leq 0.05$, and Fisher's test was used for comparison of means. The response variables were root length and % germination index, with prior analysis according to the Shapiro-Wilk & Levene models, mainly.

RESULTS AND DISCUSSION

Eleven best strains (selected based on qualitative criteria such as morphology, color, etc.) that tested positive on the selective media Pikosvkaya, NFB, NBRIP and NFB-Siderophores were selected for study as PGPR in tomato seeds, and their effect on germination rate and radicle length was determined.

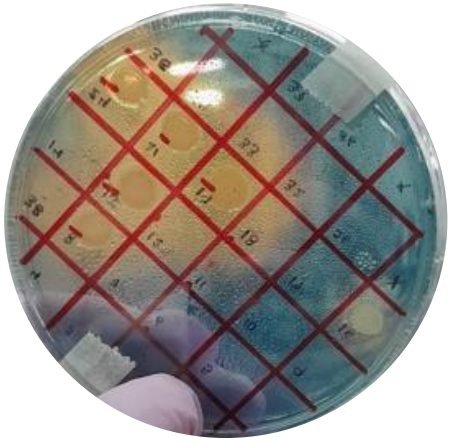


Figure 1. Isolates responding to PGPR in NFB- Siderophores as an illustration.

Effect on *S. lycopersicum* seed germination and root stimulation. The 11 treatments and the control treatment showed significant differences ($p \leq 0.05$) in more than two treatments (T21, T51, T57, and T50) concerning radicle length (Table 1) of *S. lycopersicum*, proving that these results meet the conditions of being a normal and independent variable, according to the Shapiro-Wilk & Levene tests.

Table 1. Analysis of variance of the comparison of means of the different strains tested for root stimulation.

Number of strains	Number of observations	Root length/mm
T21	15	64.2 a
T51	15	52.0 b
T57	14	39.7 c
T50	14	35.5 cd
T24	15	34.8 cd
T54	14	28.2 de
T58	14	24.6 ef
T26	14	10.2 fg
T13	13	18.4 fg
T19	15	18.3 fg
T65	15	13.8 gh
T8 (Control)	14	5.8 h
	LSD:	8.058

Where: different letters indicate minimum significant difference at $p \leq 0.05$.

The results show that strains T21, T51, and T57 were different ($p < 0.001$) from all others in terms of stimulating root length. From this, it can be observed that the best strains were T21 and T51 ($p < 0.001$), followed by those that stimulate root growth, but not in an outstanding way, T57, T50, and T24 ($p < 0.001$). The other strains cannot be ruled out, as they could provide adequate root stimulation in a more enriched environment, such as natural soil, with the exception of the control treatment (T8), which showed the lowest root elongation. Also highlights Tapia-Vázquez *et al.* (2020) showed that bacteria of the genus *Pseudomonas* sp. (strain Lp3.2) increased tomato root elongation by 165% in 15 days, results similar to those obtained in our work, where the selected strains (T21, T50, T51, T57, etc.) favored radicle elongation by 73.1 to 143.8 per cent compared with the Control, with strains T21 and T51 standing out as the most promising. These results exceed three times those reported by Radzki *et al*. (2013), with a radicle elongation effect of 36% compared with the control. It is worth mentioning that it would be advisable to study other seeds from other crops of agricultural interest to determine whether the same effect occurs, as well as to incorporate other controls with commercial biofertilizers. Regarding the germination index (%), this variable (normal and independent variable, according to the Shapiro-Wilk & Levene tests), the results of which are shown in Table 2.

The results showed that strains T21 and T51 exhibited the highest germination rate, corresponding to the results obtained for root length in these treatments and exceeding the control treatment by more than 100%, with 397% and 322% ($p < 0.001$), respectively. These results show a better visualization of each strain on the germination effect of the radicle of the seeds tested. As can be seen, the order of the treatments (strains) changes slightly, so that this index corresponds directly to root length, in germination, our work recorded an index of 205 to 397, exceeding the control by a value of 15; results similar to those recorded by Tapia-Vázquez *et al*. (2020). With these results, strains T21 and T51 are promising candidates for study as PGPM in other agricultural crops established in the

vicinity of the Atoyac River in Tlaxcala. In addition, molecular biology will be used to study the identification and taxonomic determination of the most promising strains.

Table 2. Analysis of variance of the comparison of means of the different strains tested according to the % germination index.

Number of strains	Number of observations	Germination index/%
T21	15	397 a
T51	15	322 b
T57	14	229 c
T24	15	215 c
T50	14	205 cd
T54	14	163 de
T58	14	142 ef
T19	15	113 fg
T26	14	111 fg
T13	13	98 fg
T65	15	85 g
T8 (Control)	14	15 h
	LSD:	48.327

Note: different letters indicate a significant difference at $p \leq 0.05$.

CONCLUSIONS

Bacteria from strains T21 and T52 are promising as potential PGPM for *S. lycopersicum* cultures, favoring root length and confirmed by the germination rate compared with the control treatment. Therefore, they may be candidates for agricultural crop establishment without negative effects on other soil communities or harm to human and animal health, providing alternatives to meet SDGs 12, 13, and 15, among others.

AKNOWLEDGEMENT

To the Instituto Politécnico Nacional for its funding. Projects: SIP 20251210, SIP 20253959, and SIP 20250364.

BIBLIOGRAPHY

Guo, J., Chen, Y., Zhao, Y., Tian, H., Jiang, Y. & Zhang, Y. (2025). Molecular Mechanisms of Wheat Acclimation to Soil Degradation: Insights into Salt Stress, Heavy Metal Contamination, and Nutrient Deficiency. *Environmental and Experimental Botany*, 106193. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2025.106193.

Laishram, B., Devi, O. R., Dutta, R., Senthilkumar, T., Goyal, G., Paliwal, D. K., ... & Rasool, A. (2025). Plant-microbe interactions: PGPM as microbial inoculants/biofertilizers for sustaining crop productivity and soil fertility. *Current Research in Microbial Sciences*, 8, 100333. https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100333.

Meza Zamora A. (2019). Efecto del uso de digestato y un biofertilizante sobre la producción de pasto ovillo (*Dactylis glomerata* L.). Disertación de tesis. Maestría en Ciencias Biotecnología Aplicada, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Instituto Politécnico Nacional. Pp 100.

Narayanan, M. & Ma, Y. (2024). Recent progress on conservation and restoration of soil fertility for horticulture. *Chemosphere*, 362, 142599. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142599.

Radzki, W., Gutierrez Mañero, F. J., Algar, E., Lucas García, J. A., García-Villaraco, A. & Ramos Solano, B. (2013). Bacterial siderophores efficiently provide iron to iron-starved tomato plants in hydroponics culture. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 104(3), 321-330. DOI 10.1007/s10482-013-9954-9.

Satya, S., Dashora, M., Palsania, P., Dar, M. A. & Kaushik, G. (2025). Unraveling the potential of soil microbes for simultaneous nutrient solubilization and pesticide degradation toward sustainable agriculture. *Pedosphere*. https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2025.02.001.

Tapia-Vazquez, I., Sanchez-Cruz, R., Arroyo-Dominguez, M., Lira-Ruan, V., Sanchez-Reyes, A., del Rayo Sanchez-Carbente, M., ... & Folch-Mallol, J. L. (2020). Isolation and characterization of psychrophilic and psychrotolerant plant-growth promoting microorganisms from a high-altitude volcano crater in Mexico. *Microbiological Research*, 232, 126394.

Zahid, M., Abbasi, M. K., Hameed, S. & Rahim, N. (2015). Isolation and identification of indigenous plant growth promoting rhizobacteria from Himalayan region of Kashmir and their effect on improving growth and nutrient contents of maize (Zea mays L.). *Frontiers in microbiology*, *6*, 207. http://dx.doi.org/10.3389/fmicb.2015.00207.

LOS INSUMOS ORGÁNICOS INFLUYEN EN LA CALIDAD DE ARÁNDANO (*Vaccinium ashei* R.) CV. "OJO DE CONEJO"

Danya Osorio Solis[1]; Javier Cruz Hernández[1]; Juventino Ocampo Mendoza[1]; Juan Morales Jiménez[1]

[1] Colegio de Postgraduados Campus Puebla, Boulevard Forjadores de Puebla No. 205, Momoxpan, San Pedro Cholula, 72765, Puebla, México.

Correo del autor de correspondencia: javiercruz@colpos.mx

RESUMEN

La producción extensiva de arándano "Ojo de conejo" en el estado de Puebla presenta escaso uso de tecnología, con los consiguientes bajos rendimientos y calidad de fruta. La aplicación de bioinsumos o insumos orgánicos a las plantaciones puede incrementar la calidad de la fruta de esta especie. El objetivo consistió en valorar la aplicación de bioinsumos para mejorar las características del fruto de arándano en el municipio de Hueyapan, Puebla. Se comparó el factor aplicación de insumos al suelo (Asuelo) en dos niveles: aplicación orgánica (AO) y fertilización del productor (FP), y cada uno de estos niveles en combinación con tres niveles de fertilización foliar (Ffoliar): sin fertilización foliar (sff), aplicación foliar de té de lombricomposta (fft) y fertilización foliar commercial orgánica con Ca Boron K® (ffc), con seis tratamientos y cinco repeticiones de cada uno, en un diseño en bloques al azar con arreglo factorial. Se evaluaron variables morfológicas y de calidad de fruta. Los resultados se sometieron a un análisis de varianza por tratamientos y factores, y pruebas de comparación de medias Tukey ($p<0.05$). Con las dos formas de fertilización al suelo en combinación con aplicaciones foliares se alcanzaron diferencias estadísticas significativas en variables de calidad de fruto, dependiendo del tipo de fertilización aplicado. La fertilización foliar influyó en la calidad de fruto de arándano "Ojo de conejo".

PALABRAS CLAVE: *Fertilización; foliar; fruto; sólidos totales; té.*

INTRODUCCIÓN

Los arándanos se adaptan a un manejo intensivo en cultivos hidropónicos o de fertirrigación, pero también responden al manejo orgánico y en especial a los aportes de composta, lombricomposta e incorporación de abonos verdes como fuente de materia orgánica, microorganismos benéficos y nutrimentos aplicados al suelo (Céspedes, 2012).

Sin embargo, los escasos estudios en producción orgánica en el estado de Puebla limitan un manejo adecuado de las plantaciones de arándano, aunado a que predomina el sistema de producción extensivo, que se caracteriza por un bajo uso de tecnología, con nulo o poco manejo de poda y fertilización, y con un elevado ataque de plagas y enfermedades, que llevan a obtener baja calidad de fruta y rendimientos inferiores a la media nacional (SIAP, 2024). Al respecto, López (2013) al aplicar cinco fertilizantes foliares orgánicos, observó una mejora en los índices de calidad en frutos de arándano.

Por su parte, Castillo *et al*. (2016) estudiaron la dinámica y distribución nutrimental en arándano Ojo de Conejo, en Zacatlán, Puebla. Mientras que, González (2021) aplicó fertilización foliar de extractos de algas en concentraciones de 1, 2 y 3% en arándano para aumentar rendimiento y calidad de fruto; pero, este tipo de investigación es escasa, lo que limita generar programas de fertilización pertinentes para el cultivo.

En diversos estudios se ha valorado el efecto de enmiendas orgánicas con mejoras en características físicas y químicas de los suelos, con efecto positivo en la conservación de humedad, reducción de la pérdida de nutrientes por lixiviación, la mejora de la diversidad microbiana, así como efectos positivos en crecimiento, rendimiento y calidad de diferentes cultivos (Luo *et al*., 2018), pero también son escasos los estudios en frutales y en particular en arándano cv. Ojo de conejo. De esta manera, se buscó valorar la incorporación de insumos orgánicos al suelo (AO) en comparación con la fertilización del productor (FP), y ambas en combinación con sin fertilización foliar, aplicaciones de té de lombricomposta o fertilización foliar con un insumo comercial, para la mejora de la calidad de los frutos de arándano Ojo de conejo en Hueyapan, Puebla.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se estableció una parcela experimental en una plantación de arándano CV "Ojo de conejo" en el municipio de Hueyapan, Puebla, en un clima semicálido húmedo, con temperatura media anual de 20°C, y una precipitación promedio de 2800 mm (INEGI, 2010), en un suelo Andosol húmico.

Se evaluaron los factores de estudio: aplicación de insumos orgánicos al suelo (Fs) y aplicación foliar (Ff). En los Fs se valoraron dos niveles: aplicación de insumos orgánicos (AO) y fertilización del productor (FP). La AO consistió en la aplicación conjunta de biochar (carbón con ácidos húmicos y microorganismos a base de hongos micorrízicos arbusculares y consorcio de bacterias) y vermicomposta a 5 t ha^{-1} en el área del cajete de cada planta. La FP incluyó la incorporación de Green More G 4-3-2 más Suporg 0-0-52+18 (S) Greenhow® (20 g/planta) y 5 t ha^{-1} de composta. Ambas aplicadas una sola vez antes de la caída de hojas. En la fertilización foliar se aplicaron tres niveles: 1) sin fertilización foliar (sff), 2) fertilización foliar comercial con Ca Boron K® (2 ml L^{-1} de agua, 450 ml $planta^{-1}$) (ffc) y 3) té de lombricomposta (fft) al 50% (450 ml $planta^{-1}$). Así, cada nivel de aplicación al suelo se combinó con la fertilización foliar en un total de seis tratamientos. Se usó un diseño en bloques completos al azar con seis tratamientos (2x3), con tres bloques y cinco plantas de arándano por unidad experimental. Se realizaron tres aplicaciones foliares, hasta 20 días antes de la cosecha. Las variables medidas en el estudio (promedio de dos cortes, 20 frutos/planta/corte) fueron: peso, diámetro y longitud de fruto, índice de forma y de redondez, resistencia con un penetrómetro (Pasamer Silver®, modelo GY-2, China), color L, a y b con un colorímetro (ChromaQ® modelo CS-10, China), y °Bx con un refractómetro (Hanna® modelo HI96801, USA). Los datos obtenidos del experimento se analizaron con el programa estadístico InfoStat mediante un análisis de varianza y una prueba de comparación de medias con el procedimiento Tukey ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El tratamiento de FPffcf con K boron Ca® presentó los mayores valores de firmeza de fruto, comparable solo con la aplicación orgánica al suelo y sin fertilización foliar (FOsff), a diferencia de la FP sin aplicación foliar (FPsff) donde el resultado fue menor y estadísticamente similar al FP con aplicación foliar de té (FPfft) (Cuadro 1). López (2013) indica que al comparar el efecto de cinco fertilizantes foliares comerciales no se obtuvieron diferencias estadísticas entre los tratamientos. Por su parte, Romero *et al*. (2023) refieren que la firmeza es un atributo de calidad en el arándano y que, junto con el sabor, son características que determinan la opción de compra.

En sólidos solubles totales (°Bx), la FPffc y la FO con fertilización foliar con té de Lombricomposta Fernatol® (FOfft) resultaron estadísticamente similares y superiores únicamente en comparación con la FPsff y FPfft, en los que además se registraron los valores estadísticamente inferiores. Al respecto, Romero *et al*. (2023) indican que los azúcares son los responsables del dulzor del fruto y que la medición de SST en arándano está cercana al contenido total de azúcares. Retamales y Hancok (2018) y Romero *et al*. (2023) coinciden en indicar que esta variable debe tener un valor mayor a 10 (p/p) (porcentaje peso a peso).

Con relación al color de fruto de arándano, el tratamiento FOffc fue el que obtuvo una mayor intensidad de color (L), a diferencia del tratamiento de FOsff con el que se alcanzó el menor resultado. Para el color en la escala "a", los tratamientos se ubicaron hacia la zona de variación del color verde, con valores estadísticamente superiores en el tratamiento de FPffc en comparación con el resto de tratamientos evaluados, mientras que en la escala "b" los frutos se ubicaron en la zona de color azul, siendo una característica distintiva de la baya de esta especie, y en la que los valores estadísticamente superiores se obtuvieron con la FPffc, pero que resultó únicamente diferente en comparación con la FPfft (Cuadro 1). El color del fruto es un indicador importante de su madurez y fecha de cosecha. Los fertilizantes foliares utilizados por Zydlik *et al*. (2022) modificaron la coloración del fruto del arándano. El color azul en los arándanos se debe a los pigmentos de antocianina en el epicarpio y a la estructura y calidad de la cera en la piel (Ciucu *et al*., 2023). Se ha observado que el tipo de fertilizantes foliares usados influye de manera significativa en esta característica, mientras que la fertilización de plantas con insumos orgánicos también se relaciona con los niveles alcanzados de luminosidad (L*) en el espacio de color (Ciucu *et al*., 2023).

En el factor Aplicación al suelo (Asuelo) se observaron efectos y diferencias significativas en las variables firmeza y sólidos solubles totales (Cuadro 1). La aplicación de insumos orgánicos al suelo (FO) resultó en niveles estadísticamente superiores en comparación con la fertilización del productor (FP). Zydlik *et al*. (2022) encontraron que, como resultado de la fertilización de arándano, los frutos recolectados de esos arbustos se caracterizaron por una mayor masa, firmeza y contenido de SST.

Para el factor y niveles de fertilización foliar, en la variable firmeza de fruto la ffc resultó estadísticamente superior, mientras que en SST manifestó valores estadísticamente similares a la fft (Cuadro 1).

Cuadro 1. Comparación de medias de variables de calidad de fruta de arándano, por efecto de insumos orgánicos aplicados al suelo y follaje en Hueyapan, Puebla.

Factor / Tratamiento	Firmeza (kg cm²)		Sólidos solubles totales (°Bx)		Color					
					L		a		b	
AOsff	3.42	d	17.13	ab	35.08	a	-7.33	b	-2.55	ab
AOffc	3.23	cd	17.26	ab	40.11	c	-7.27	b	-3.15	ab
AOfft	3.02	bc	17.94	b	39.58	c	-7.25	b	-2.89	ab
FPsff	2.53	a	16.37	a	38.29	bc	-6.69	bc	-2.7	ab
FPffc	3.51	d	18.17	b	38.59	bc	-8.22	a	-3.58	a
FPfft	2.78	ab	16.15	a	36.81	ab	-6.35	c	-2.35	b
DMS	0.343		1.227		2.429		0.699		1.144	
p-valor	0.0001		0.0001		0.0001		0.0001		0.0333	
Aplicación al suelo										
AO	3.23	b	17.44	b	37.90	a	-7.28	a	-2.86	a
FP	2.94	a	16.90	a	38.26	a	-7.08	a	-2.88	a
DMS	0.135		0.484		0.958		0.276		0.451	
p-valor	0.0001		0.0268		0.4566		0.1589		0.9489	
Aplicación foliar										
Sff	2.98	a	16.75	a	36.69	a	-7.01	b	-2.63	b
Ffc	3.37	b	17.72	b	39.35	b	-7.74	a	-3.37	a
Fft	2.90	a	17.04	ab	38.20	b	-6.80	b	-2.62	b
DMS	0.135		0.711		1.407		0.405		0.663	
p-valor	0.0001		0.0052		0.0001		0.0001		0.0108	

Medias con la misma letra en columnas no difieren estadísticamente entre sí (Tukey p≤0.05). DMS: diferencia mínima significativa. AO= Aplicación Orgánica, FP= Fertilización Productor, sff= sin fertilización foliar, ffc= K boron Ca® y fft= Té de lombricomposta Fernatol®. L: intensidad de color, a: zona de variación entre el verde y el rojo, y b: zona de variación entre el azul y el amarillo del espectro.

En luminosidad de fruto (L), esos dos niveles de ff presentaron valores estadísticamente similares y ambos resultaron superiores a sin fertilización foliar (sff). En color "a" y "b" el nivel que manifestó estadísticamente los valores más negativos fue la ffc, con una tendencia más al color azul verde y al color azul intenso típico del arándano Ojo de conejo maduro o con madurez más avanzada. Lopes *et al*. (2024) señalan que los frutos de arándano 'Duke' tratados de manera foliar con un bioestimulante a base de *Ecklonia maxima* (EM) fueron más firmes y, luego del tratamiento con 4 L/ha EM + 4 kg/ha de glicina-betaína (GB), obtuvieron una menor concentración de ácidos orgánicos, un mayor dulzor sensorial y menor acidez. La aplicación foliar tanto de EM como de GB tendió a disminuir los parámetros L* y C* de los arándanos, lo que resultó en frutos más oscuros, y que puede sugerir una etapa de madurez más avanzada.

CONCLUSIONES

La aplicación al suelo de insumos orgánicos y la combinación con aplicaciones foliares influyeron significativamente en la calidad de fruto de arándano, dependiendo del tipo de fertilización utilizada. De manera particular, las aplicaciones de insumos orgánicos al suelo y la fertilización foliar con K boron Ca® manifestó mejoras en firmeza, sólidos solubles totales, color, así como en diámetro polar, peso fresco y seco de frutos.

AGRADECIMIENTOS

En agradecimiento al CONAHCYT y al CP Campus Puebla, por el apoyo otorgado para los estudios de Maestría en Desarrollo e Innovación en Fruticultura Familiar de la primera autora.

BIBLIOGRAFÍA

Castillo, G.A.M., Avitia, G.E. & Valdez, A.L.A. (2016). Dinámica nutrimental en hoja y fruto de arándano tipo Ojo de Conejo (*Vaccinium ashei* Reade). *Tecnociencia Chihuahua*. 10(2): 71.

Céspedes, L.M.C. (2012). Producción hortofrutícola orgánica. Boletín INIA Nº 232. *Instituto de Investigaciones Agropecuarias*, Chillán, Chile. 192 p.

Ciucu, P.M., Nicola, C. & Hoza, D. (2023). Effect of organic foliar fertilizers on yield and fruit quality of seven highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* l.) cultivars. Scientific Papers. *Series B, Horticulture*. 67(1): 68-77.

González, J.J.E. (2021). Fertilización orgánica foliar en arándano 'ojo de conejo' en rendimiento y calidad de fruto. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla. p. 31.

INEGI, 2010. Compendio de información de municipios, Hueyapan, Pue. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/21/21075.pdf Consultado el 06 de mayo de 2024.

López, L.G. (2013) Fertilización foliar orgánica y su relación con la calidad de fruto en arándano azul tipo Ojo de conejo (*Vaccinium aschei* Reade). Tesis de Maestría. Instituto de Horticultura. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Edo. de México. 93 p.

Lopes, T., Silva, A.P., Ribeiro, C., Carvalho, R., Aires, A., Vicente, A.A. & Gonçalves B. (2024). *Ecklonia máxima* and Glycine–Betaine-Based Biostimulants Improve Blueberry Yield and Quality. *Horticulturae*. 10(9):920. https://doi.org/10.3390/horticulturae10090920.

Luo, G., Li, L., Friman, V. P., Guo, J., Guo, S., Shen, Q. & Ling, N. (2018). Organic amendments increase crop yields by improving microbe-mediated soil functioning of agroecosystems: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 124:105-115. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.06.002

Retamales, J.B. and Hancock, J.F. (2018). Bueberries. Crop Production Science in Horticulture. 2nd. Edition. CABI, USA. p. 1-413.

Romero, M.I., Defilippi, B.B., Álvarez, R.E. & González, G.A. (2023). Atributos de calidad e índices de madurez y cosecha. Calidad en arándanos: bases fisiológicas y tecnológicas para el manejo de cosecha y postcosecha. Defilippi B. B, Ulloa, F. P. (Eds). Instituto de Investigaciones Agropecuarias. *Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias*. N° 477. Santiago, Chile. Pp. 9-18. https://biblioteca.inia.cl/items/d533494b-da9c-4743-89a4-3b76719069b6.

SIAP (Servicio de Información, Agroalimentaria y Pesquera). (2024). https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/ Consultado el 3 de junio de 2024.

Zydlik, Z., Zydlik, P., Kafkas, N.E., Yesil, B. & Cieśliński, S. (2022) Foliar Application of Some Macronutrients and Micronutrients Improves Yield and Fruit Quality of Highbush Blueberry (Vaccinium corymbosum L.). *Horticulturae*. 8(7):664. https://doi.org/10.3390/horticulturae8070664.

RENDIMIENTO DE VARIEDADES DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.) ASOCIADAS CON MAÍZ (*Zea mays* L.) Y CALABAZA (*Cucúrbita pepo* L.)

Rosa Elena Macias Luna[1]; Rodolfo de la Rosa Rodríguez[2]; Alfredo Lara Herrera[1]; Martha Patricia España Luna[1]; Ma. Del Rosario Martínez Blanco[2]

[1] Unidad Académica de Agronomía de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Carretera Zacatecas-Guadalajara Km. 15.5 C.P. 98170 Zacatecas, Zac. México.

[2] Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Avenida Ramón López Velarde 801, Colonia Centro, C.P. 98000, Zacatecas, Zac. México.

Correo del autor de correspondencia: rodo9003@gmail.com

RESUMEN

El crecimiento y/o desarrollo de dos o más especies vegetales puede definirse como asociación de cultivos. Se aplicaron 22 tratamientos consistentes en variedades de frijol sin asociar y asociadas con maíz (M) y calabaza (C); Rosa de Castilla (RC); RC-C; RC-M; Rojo Intenso Oaxaca (RIO); RIO-M; Bola Morado Rayado (BMR); BMR-M; Negro Opaco (NO); NO-M; Bola Brilloso Violento (BBV); BBV-M; Negro Opaco Alargado (NOA); NOA-M; Crema Valparaíso (CV); CV-M; Negro Brilloso (NB); NB-M; Bola Liso Morado (BLM); BLM-M; Bola Cremoso Rayado Oaxaca (BCR); BCR-M y CV-C. Se midieron las variables de Peso en ejote, Número de ejotes, Rendimiento en frijol sin cosecha de ejote, Rendimiento en frijol con cosecha de ejote y Rendimiento de maíz. Para el caso de maíz no se tuvo diferencia significativa entre tratamientos de variedades de frijol asociadas a maíz. La variedad Crema Valparaiso obtuvo los valores más altos en cosecha de frijol en ejote y grano y, aunque su asociación con maíz estuvo por debajo si fue superior al resto de los tratamientos en los que se asoció con calabaza.

PALABRAS CLAVE: *Sinergia; Sustentabilidad; Policultivo; Rendimiento.*

INTRODUCCIÓN

El crecimiento y/o desarrollo de dos o más especies vegetales puede definirse como asociación de cultivos, esto puede llevarse a cabo sólo en parte o en la totalidad del ciclo vegetativo (Pérez-López *et al*., 2013). Esta asociación puede tener ciertos beneficios, como optimización de recursos, diversidad biológica, disminución de impacto negativo ambiental; así como asegurar comercialización y el rendimiento puede favorecerse en conjunto. La asociación específica de maíz y frijol trae beneficios para ambas especies; ya que tienen similitud de condiciones de desarrollo, tiempo de siembra y cosecha lo que hace que sean compatibles en asociación (Torres-Calderón *et al*., 2018). Investigaciones realizadas demuestran que el asocio de cultivos tiene mayores beneficios que cuando se establecen monocultivos. Existe aún necesidad de generar información respecto a los beneficios productivos de la asociación del frijol con maíz y otras especies, al respecto se

planteó el objetivo de evaluar el rendimiento de la asociación entre 10 variedades de frijol tipo IV con maíz y calabaza.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento. El experimento se llevó a cabo en condiciones de invernadero en la Unidad Académica de Agronomía en el municipio de Cieneguillas, Zacatecas, México, en las coordenadas 22°43'42.4"N 102°41'07.8"W y 2233 m de altitud.
Tratamientos y diseño experimental. Se aplicaron 22 tratamientos consistentes en variedades de frijol sin asociar y asociadas con maíz (M) y calabaza (C): Rosa de Castilla (RC); RC-C; RC-M; Rojo Intenso Oaxaca (RIO); RIO-M; Bola Morado Rayado (BMR); BMR-M; Negro Opaco (NO); NO-M; Bola Brilloso Violento (BBV); BBV-M; Negro Opaco Alargado (NOA); NOA-M; Crema Valparaíso (CV); CV-M; Negro Brilloso (NB); NB-M; Bola Liso Morado (BLM); BLM-M; Bola Cremoso Rayado Oaxaca (BCR); BCR-M y CV-C.
Siembra y material vegetal. Las tres especies se sembraron manualmente. El frijol se sembró a una distancia de 0.50 m, en camas a doble hilera a 0.40 m entre hileras. Las camas midieron 20 m de largo, 0.80 m de ancho (densidad de 24 600 plantas ha^{-1}). El maíz fue criollo sembrado a una distancia entre semillas de 0.25 m, en la parte central de las camas, considerando una distancia de 0.20 m entre las hileras del frijol. La calabaza criolla fue sembrada a una distancia entre semillas de 1 m, en la parte central de las camas, únicamente en la mitad de las camas correspondientes aleatoriamente.
Variables de estudio. Se determinaron en frijol las siguientes variables: número de ejotes (contabilizando ejotes) y peso de ejote, posteriormente se determinó rendimiento de frijol sin cosecha de ejote y rendimiento de frijol con cosecha de ejote ambas en kilogramos por metro cuadrado. En maíz se determinó el peso total obtenido. Las variables de peso se determinaron con una báscula Kern AES 200-4N con precisión de 0.001 g.
Análisis estadístico. La información recabada se analizó en un diseño de bloques completos al azar en el programa SAS versión 9.4 con un análisis de varianza y una prueba de medias con el criterio de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Número de ejotes. Para esta variable Crema Valparaiso sin asociación fue una variedad con valores altos logrando el 17% del total alcanzado (13,991 ejotes cosechados), sin embargo, estos resultados sólo superaron estadísticamente a las variedades Bola Morado Rayado no asociado y asociado con maíz, también superó a las variedades Negro Brilloso, Bola Liso Morado y Bola Cremoso Rayado, pero sólo cuando estuvieron asociadas con maíz. Con el resto de las variedades, la variedad mencionada (Crema Valparaiso) no tuvo diferencias estadísticas (Cuadro 1). Estos comportamientos pudieron deberse a las diferencias que puede haber en la capacidad de la planta de frijol para crecer y desarrollarse en una condición determinada influenciada por el cultivar (Morales-Rosales *et al*., 2008).
Peso en ejote. Crema Valparaiso fue estadísticamente superior (con el 19.5% del total producido) a las variedades Rojo Intenso Oaxaca, Bola Morado Rayado, Bola Brilloso Violento y Negro Brilloso en dos de las tres modalidades, es decir, asociadas con maíz y

no asociadas, alcanzando promedios de 1.4% del total. También la misma variedad mencionada fue superior (18%) a las variedades Negro Opaco Alargado y Bola Liso Morado, pero estas sólo sin asociar y asociada con maíz respectivamente ya que asociada y sin asociar respectivamente fueron iguales a Crema Valparaiso (Cuadro 1). Al asociar cultivos puede obtenerse buena respuesta de las plantas implicadas, sin embargo, también el desarrollo de una especie o ambas puede verse afectada por la competencia que ocurre entre ambas (Delgado-Martínez *et al*., 2014).

Rendimiento en frijol sin cosecha de ejote. Crema Valparaiso sin asociación fue superior a todas las demás de manera contundente logrando el 17% de todo el grano cosechado, mientras el resto de las variedades sólo obtuvo en promedio 4% del total de grano obtenido (Cuadro 1). Las variedades Rosa de Castilla, Negro Opaco sin asociación y Crema Valparaiso asociada con maíz no superaron a Crema Valparaiso sin asociar, sin embargo, sí fueron superiores a los 18 tratamientos restantes (Cuadro 1). El rendimiento que puede obtenerse en el cultivo de frijol está fuertemente influenciado por la habilidad competitiva de cada cultivar utilizado (Morales-Rosales *et al*., 2008).

Cuadro 1. Variables de rendimiento de frijol sin asociación y con asociaciones de calabaza y maíz.

Tratamientos	EJOTE		GRANO	
	Peso de ejotes (Kg)	Número de Ejotes	Rendimiento sin cosecha de ejote (Kg/m^2)	Rendimiento con cosecha de ejote (Kg/m^2)
RC	5.81ab	1810ab	72.23b	38.67bc
RC-C	1.76ab	663ab	25.86def	10.56def
RIO-M	1.09b	391ab	5.63f	7.39def
RIO	1.15b	406ab	18.46ef	8.25def
BMR	0.15b	43b	2.08f	1.25f
BMR-M	0.32b	93b	4.71f	3.69ef
NO-M	2.23ab	676ab	23.13ef	9.29def
NO	3.12ab	893ab	65.69bc	23.56cdef
BBV-M	0.72b	288ab	5.19f	7.29def
BBV	0.95b	380ab	15.33ef	10.69def
NOA	0.60b	193ab	22.17ef	2.61ef
NOA-M	2.84ab	916ab	18.94ef	16.63cdef
CV	8.92a†	2370a	110.50a	105.31a
CV-M	4.06ab	911ab	71.25b	36.00bc
NB-M	0.27b	103b	14.48ef	23.48cdef
NB	0.61b	235ab	27.19def	17.61cdef
BLM-M	0.09b	33b	9.54f	18.41cdef
BLM	2.24ab	831ab	39.79cde	27.14cde
BCR-M	0.07b	23b	3.14f	6.42ef
BCR	1.74ab	580ab	22.52ef	36.29bc
RC-M	3.88ab	1144ab	54.67bcd	53.96b
CV-C	3.20ab	1008ab	23.23ef	505.00bcd
DMS	7.256	2244.200	479.260	400.490

RC=Rosa de Castilla; RC-C=Rosa de Castilla x Calabaza; RIO-M=Rojo Intenso Oaxaca x Maíz; RIO=Rojo Intenso Oaxaca; BMR=Bola Morado Rayado; BMR-M=Bola Morado Rayado x Maíz; NO-M=Negro Opaco x Maíz; NO=Negro Opaco; BBV-M=Bola Brilloso Violento x Maíz; BBV=Bola Brilloso Violento; NOA=Negro Opaco Alargado; NOA-

M=Negro Opaco Alargado x Maíz; CV=Crema Valparaíso; CV-M=Crema Valparaíso x Maíz; NB-M=Negro Brilloso x Maíz; NB=Negro Brilloso; BLM-M=Bola Liso Morado x Maíz; BLM=Bola Liso Morado; BCR-M=Bola Cremoso Rayado Oaxaca x Maíz; BCR=Bola Cremoso Rayado Oaxaca; RC-M=Rosa de Castilla x Maíz y CV-C=Crema Valparaíso x Calabaza. † = Cifras seguidas con la misma letra en cada columna son iguales ($p \leq 0.05$), DMS = Diferencia mínima significativa.

Rendimiento en frijol con cosecha de ejote. La variedad Crema Valparaiso sin asociar superó al resto de los tratamientos ensayados, a pesar de ello, le continuaron las variedades Rosa de Castilla sin asociar y la asociación de Crema Valparaiso y Rosa de Castilla con maíz siendo estas superiores al resto de los 18 tratamientos, calabaza asociada a frijol mostró los valores más bajos (Cuadro 1), esto puede deberse a la buena sinergia que ocurre entre maíz y frijol más que entre frijol y calabaza y que por sí solos (Zhang *et al*., 2014). Los resultados encontrados en la presente investigación concuerdan con lo reportado por Ebel *et al*. (2017), quienes encontraron mejor respuesta de la asociación de frijol con maíz que de frijol con calabaza.

Rendimiento en maíz. La variedad Bola Liso Morado fue superior (42%) a la variedad Bola Cremoso Rayado Oaxaca, sin embargo, no fue mayor que las demás variedades asociadas a maíz con las que no tuvo diferencias estadísticas (Cuadro 2). Esta investigación coincide con lo reportado con Ebel *et al*. (2017) ya que la producción de maíz se ve favorecida por la asociación de frijol, pero depende también de la competencia interespecífica de las plantas de cada especie y de la sinergia que se desarrolle entre las especies asociadas.

Cuadro 2. Rendimiento de grano de maíz asociado con variedades de frijol.

Tratamientos	Rendimiento de grano de maíz (Kg)
RIO-M	3.04ab
BMR-M	3.47ab
NO-M	3.4ab
BBV-M	3.15ab
NOA-M	2.64ab
CV-M	3.43ab
NB-M	3.10ab
BLM-M	3.80a
BCR-M	2.21b
RC-M	2.52ab
DMS	1.432

RIO-M=Rojo Intenso Oaxaca x Maíz; BMR-M=Bola Morado Rayado x Maíz; NO-M=Negro Opaco x Maíz; BBV-M=Bola Brilloso Violento x Maíz; NOA-M=Negro Opaco Alargado x Maíz; CV-M=Crema Valparaíso x Maíz; NB-M=Negro Brilloso x Maíz; BLM-M=Bola Liso Morado x Maíz; BCR-M=Bola Cremoso Rayado Oaxaca x Maíz; RC-M=Rosa de Castilla x Maíz. † = Cifras seguidas con la misma letra en cada columna son iguales ($p \leq 0.05$), DMS = Diferencia mínima significativa.

CONCLUSIONES

La variedad de frijol Crema Valparaiso destacó con resultados superiores en las variables de rendimiento de frijol evaluadas (Peso en ejote, Número de ejotes, Rendimiento en frijol sin cosecha de ejote, Rendimiento en frijol con cosecha de ejote), sin embargo, este comportamiento sólo se presentó cuando se empleó de forma unitaria, es

decir, sin asociación con maíz ni con calabaza con valores promedio de 18.62% del total producido.

BIBLIOGRAFÍA

Delgado-Martínez, R., Escalante-Estrada, J.A.S., Díaz-Ruiz, R., Trinidad-Santos, A., Morales-Rosales, E. J. & Sosa Montes, E. (2014). Defoliación en maíz y su efecto sobre el rendimiento de frijol-maíz en asociación. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *5*(6), 1015-1027.

Ebel, R., Pozas-Cárdenas, J.G., Soria-Miranda, F. & Cruz-González, J. (2017). Manejo orgánico de la milpa: rendimiento de maíz, frijol y calabaza en monocultivo y policultivo. *Terra Latinoamericana*, 35(2), 149-160.

Morales-Rosales, E.J., Escalante-Estrada, J.A.S. & López-Sandoval, J.A. (2008). Crecimiento, índice de cosecha y rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en unicultivo y asociado con girasol (Helianthus annuus L.). *Universidad y ciencia*, 24(1), 1-10.

Pérez López, A. E., Martínez-Bustamante, E., Vélez-Vargas, L.D. & Cotes-Torres, J.M. (2013), "Acumulación y Distribución de Fitomasa en el Asocio de Maíz (Zea mays L.) y Fríjol (Phaseolus vulgaris L.)." *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, Vol. 66, núm.1, pp.6865-6880 [Consultado: 5 de Junio de 2024]. ISSN: 0304-2847. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=179928411004.

Torres-Calderon, S., Huaraca-Fernández, J., Pezo, D. & Crisóstomo-Calderón, R. (2018). Asociación de cultivos, maíz y leguminosas para la conservación de la fertilidad del suelo. *Revista De Investigación: Ciencia, Tecnología Y Desarrollo*, 4.

Zhang, C., Postma, J. A., York, L. M. & Lynch, J. P. (2014). Root foraging elicits niche complementarity-dependent yield advantage in the ancient 'three sisters'(maize/bean/squash) polyculture. *Ann. Bot*. 191: 1719-1733. doi: 10.1093/aob/mcu191.

SOSTENIBILIDAD DE LOS SUELOS EN VILLA VICTORIA, ESTADO DE MÉXICO: SOLUCIONES BASADAS EN LA NATURALEZA

María Xochitl Mejía Mata[1]

[1] Ex-Hacienda Santa Cruz de los Patos Manzana 046, Zinacantepec, 51350 Zinacantepec, Méx.

Correo del autor de correspondencia: mxmejia@cmq.edu.mx

RESUMEN

Villa Victoria pertenece al Estado de México, se ubica en las coordenadas geográficas 99°59'43" W de longitud y 19°26'31" N de latitud con una altitud de 2,600 m s.n.m. Cuenta con localidades de origen Mazahua, amplias áreas naturales y una presa de gran importancia, además, pertenece al sistema Cutzamala. La presencia de diversos ríos como La Compañía, Prieto, los Coyotes, la Parada de San José, y San Marcos (ADEM, 2024) son fuentes importantes de humedad para los suelos. Sin embargo, estos carecen de los nutrientes y la fertilidad necesarios para un adecuado desarrollo de los campos agrícolas. Con base en los datos obtenidos, se evalúa hacer uso de los recursos naturales propios que brinda la naturaleza, como parte de las soluciones que la misma naturaleza brinda. Se sugiere que el relieve, la flora, la fauna, los suelos y las adecuadas prácticas agrícolas ayudarán a la recuperación de los suelos. Los recorridos y observación en campo y elaboración de cartografía permitieron analizar las fortalezas de los recursos naturales del área de estudio. Los recursos propios de naturaleza, como el tipo de suelo, drenajes, sedimentos, geometría del relieve, consentirán su uso para la recuperación de los suelos. La elaboración del mapa de disección vertical permitió identificar procesos gravitacionales, energía del relieve y la interpretación del paisaje, así como planicies onduladas de ligera, mediana a fuertemente diseccionadas, planicies acolinadas de ligera, entre otras, para ser utilizadas a beneficio del suelo a partir de las tres dimensiones: social, económica y ambiental del desarrollo sostenible.

PALABRAS CLAVE: *Cartografía; fertilidad; nutrientes; prácticas agrícolas; recursos naturales.*

INTRODUCCIÓN

Los suelos se encuentran bajo la lupa de la humanidad y de la incertidumbre en el sentido de encontrar las mejores alternativas para su recuperación, cuidado y sostenibilidad bajo la premisa de mantener la seguridad alimentaria. La erosión y degradación de estos, se ha acentuado a causa de diversas actividades antropogénicas, como las incorrectas prácticas agrícolas, deforestación, cambio de uso de suelo, sobreexplotación de mantos acuíferos, minas entre otros. El suelo representa todo un sistema, con la dinámica de diversos organismos, agua, viento, nutrientes, el relieve y los distintos agentes modificadores. Con base en lo anterior se cuestiona entonces, por qué es importante el suelo y su estudio, la respuesta puede ser sencilla o tan complicada como la concibamos, los suelos son fundamentales para el desarrollo de vida, en ellos se alberga

una cantidad inmensa de organismos que se encargan de airear los suelos, descomponer animales y plantas muertas en materia orgánica, incorporar minerales, conservar la humedad, todo esto se desarrolla en diversos procesos, con base a la textura de los suelos, entre otras características, lo anterior da lugar a suelos fértiles para poder cultivar en ellos y tomar nuestro alimento, sin embargo, también permite al ser humano edificar sobre él y desarrollar infinidad de actividades. Estos se han degradado en diversas partes del mundo y en México, ha generado gran preocupación, sobre todo porque en la salud y fertilidad de estos, está la seguridad alimentaria del ser humano.

"Al menos una vez en la vida vas a necesitar a un médico o a un abogado, pero al menos tres veces al día vas a necesitar a un agricultor." (Anónimo)

El estudio de la degradación de los suelos implica un análisis profundo desde la degradación causada por el ser humano o por la misma naturaleza como un proceso natural de sí mismo desde la desertización; sin embargo, la influencia antrópica ha sido una de las principales causales como un factor detonador de la degradación de los suelos. Saavedra (2021) expone que la Dra. Prado, investigadora del Instituto de Geología UNAM, señala que los suelos del territorio nacional se han degradado en un 45% y que es un recurso no renovable en términos de vida humana.

Por su parte, la Comisión Nacional Forestal, en colaboración con otras instituciones, llevó a cabo análisis de variables agrupadas, con el objetivo de determinar la degradación de tierras y la desertificación, integró 17 indicadores con datos certeros de instituciones oficiales. El indicador de recursos edáficos expone que la degradación de los suelos nacionales se observa en un 63.02%, con respecto al indicador integrado de degradación de tierras, los resultados indicaron que el 90.7% de la superficie nacional presenta algún tipo de degradación (CONAFOR-UACh, 2013). Los niveles de degradación expuestos a través de diversos estudios e investigaciones dejan expuesta la gravedad de la pérdida de nutrientes de los suelos y las incorrectas prácticas agrícolas que se han desarrollado por décadas; por consiguiente, la sostenibilidad implica llevar a cabo adecuadas prácticas agrícolas. Vera (2023) expone que es necesario implementar técnicas agrícolas sostenibles para conservar la calidad de los suelos (Carranza-Patiño *et al.,* 2024). La conservación y restauración de los suelos degradados y los diferentes elementos y factores del clima que han influido en ellos, así como las actividades antropogénicas, requieren hacer uso de métodos y técnicas diversas para lograr resultados positivos, como lo son las soluciones basadas en la naturaleza, que fue propuesta en el año 2000 por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) y el Banco Mundial, concepto mencionado formalmente en 2008. Sus objetivos son: proteger, gestión sostenible y restauración de los ecosistemas, para integrar soluciones desde el enfoque social, económico y ambiental (García *et al.,* 2022).

Villa Victoria muestra suelos degradados, así como baja fertilidad; la superficie agrícola se sitúa en el 65.45% (Ayuntamiento, 2022). La degradación de los suelos se ha originado por prácticas agrícolas inadecuadas, por la deforestación y el uso excesivo de fertilizantes. Orozco *et al.* (2010), enfatiza que el cambio de uso de suelo forestal a suelo agrícola ha dado lugar a incendios forestales provocados por los campesinos y ganaderos y la tala clandestina, ha dado lugar a la fragmentación y pérdida de la cubierta vegetal de

extensas áreas de bosque templado y el rápido avance de los procesos de erosión del suelo. La geometría del relieve es un factor fundamental que ha facilitado diversos procesos, sobre todo aquellos que han dado lugar a los deslizamientos y la pérdida de suelo. Sin embargo, el análisis e interpretación del paisaje permitirá desarrollar la sostenibilidad de los suelos a partir de las soluciones basadas en la naturaleza. Los sistemas de información geográfica son parte fundamental para el análisis y desarrollo de la metodología a través del uso de cartografía temática.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló bajo un propósito descriptivo, con un enfoque mixto longitudinal, observacional, con dirección prospectiva. La recolección de datos retrolectivos permitió identificar la degradación de los suelos en la zona de estudio a lo largo de los años y con el uso de cartografía temática a través del mapa de disección vertical. La investigación se desarrolló bajo un enfoque ambiental, con el objetivo de identificar las problemáticas de degradación que presentan los suelos, así como las causas y efectos que han intervenido en estos.

La investigación se desarrolló en el Municipio de Villa Victoria, ubicado en las coordenadas geográficas 99°59'43" W de longitud y 19°26'31" N de latitud con una altitud de 2,600 msnm. Tiene una extensión territorial de 423.80 km², con 128 localidades y una presa de gran importancia, que alimenta al Sistema Hidroeléctrico del Sistema Cutzamala e Ixtapaltongo (Ayuntamiento, 2022).

Se utilizó el software ArcMap para confeccionar el mapa de disección vertical. Este se elaboró con base en el Modelo Digital de Elevación (MDE) con shapes extraídos de la plataforma del INEGI, con la cartografía a escala 1:50,000. El mapa de disección vertical se confeccionó para identificar la fragmentación del relieve, las zonas vulnerables a la erosión, la degradación del suelo y la aptitud agrícola, con relación a los tipos morfométricos del relieve (Priego-Santander, 2003). El trabajo documental, de campo y el uso de los SIG permitieron el análisis e interpretación de la cartografía elaborada, para identificar las fortalezas de la naturaleza y la generación de soluciones basadas en ella desde un enfoque de la sostenibilidad a favor de los suelos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el mapa de disección vertical (Figura 1) elaborado para el Municipio de Villa Victoria, Estado de México, se observaron planicies onduladas de ligera, mediana a fuertemente diseccionadas, planicies acolinadas de ligera, mediana a fuertemente diseccionadas, lomeríos de ligera, mediana a fuertemente diseccionados y montañas de ligera a medianamente diseccionadas.

Las planicies onduladas ligeramente diseccionadas, exponen procesos de intemperismo, erosión y zonas de acumulación, en estas disecciones se observaron con facilidad procesos erosivos en los suelos, los drenajes se presentan intermitentes, gran parte del territorio tiene Andosols y en menor medida Acrisols y Phaeozems.

La vegetación se conforma de bosques de coníferas, pinos, abetos y oyameles, una gran variedad de plantas silvestres, así como una amplia diversidad de fauna.

Las zonas de planicie exponen la acumulación de sedimentos como las arcillas y limos y se observaron áreas de acumulación de agua. El proceso erosivo ha cortado el terreno y los lomeríos han sido fuertemente diseccionados; las laderas cóncavas facilitan la erosión. Las características de las microformas del relieve y los tipos de suelo, uso y ocupación del suelo (Salinas-Chávez *et al.*, 2019; Priego *et al*., 2010), permiten identificar las carencias de los suelos.

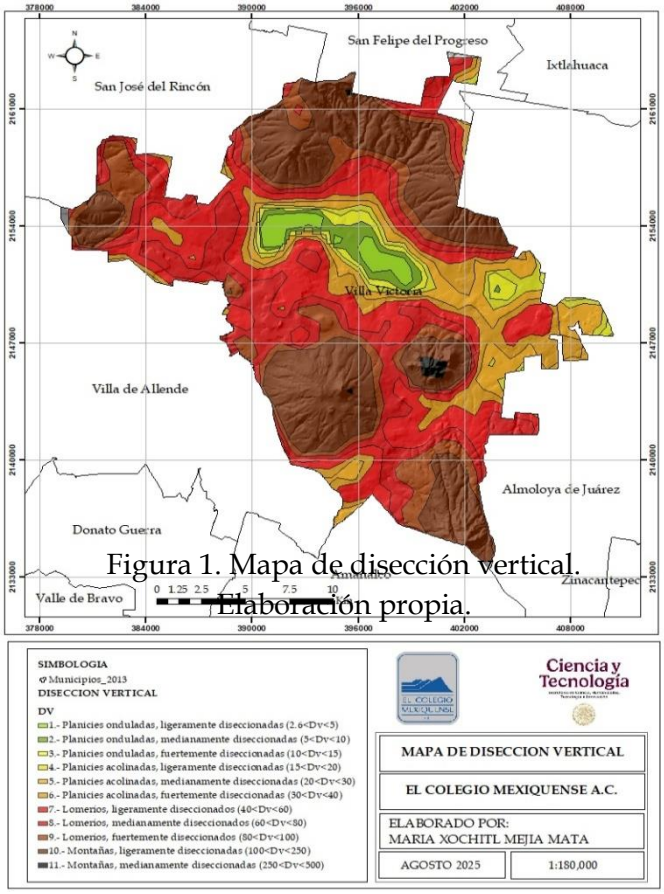


Figura 1. Mapa de disección vertical.
Elaboración propia.

En Villa Victoria, se observa el abandono de tierras agrícolas por la falta de productividad de los suelos, la baja fertilidad y la deficiencia de nutrientes como son la materia orgánica, fósforo y nitrógeno. El abandono de tierras agrícolas y la actividad ganadera han dado lugar a la compactación de suelos. La erosión que se presenta en la zona de estudio es hídrica, esta se constató a través del mapa de disección vertical y en campo, la identificación de la capacidad erosiva de los ríos permite implementar vegetación nativa, que actúe como barrera natural de los sedimentos, también se puede incorporar muros para reducir los impactos como una solución basada en la naturaleza.

CONCLUSIONES

Las soluciones basadas en la naturaleza permiten proponer en la zona de estudio la restauración forestal y agroforestal, así como aprovechar las zonas de acumulación de agua para generar jardines o bosques de lluvia, a través de la captación de agua de lluvia y la construcción de muros de gavión, zanjas y surcos, entre otros. Asimismo, la conservación o restauración de humedales, el aprovechamiento de los sedimentos para generar Technosols; que permitan la restauración y la implementación de lombricomposta. Debido a que en diversas zonas agrícolas fue posible observar suelos más mineralizados con poca o casi nula presencia de microorganismos, huertos familiares e hidroponía, a favor de la sostenibilidad de los suelos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a El Colegio Mexiquense A.C., a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación y al Municipio de Villa Victoria, Estado de México por la confianza y el apoyo brindado.

BIBLIOGRAFÍA

Ayuntamiento, d. V. (2022). *Plan de Desarrollo Municipal*. Ayuntamiento de Villa Victoria.

Carranza-Patiño, M. A.-S.-B.-S.-R. (2024). Conservación y Manejo Sostenible del Suelo en la Agricultura: Una Revisión Sistemática de Prácticas Tradicionales y Modernas. *Código Científico Revista De Investigación, 5*(E3), 1–28. https://doi.org/https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/nE3/303.

CONAFOR-UACh. (2013). *Línea base nacional de degradación de tierras y desertificación*. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo. Zapopan, Jalisco.

García, B. S.-Ś. (2022). What are Nature-based solutions (NBS)? Setting core ideas for concept clarification. *Nature-Based Solutions, 2*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100009.

Lugo-Hubp, J. (1980). La disección del relieve en el sur de la Cuenca de México. *Investigaciones Geográficas*.

Lugo-Hubp, J. R.-P. (1981). La disección del relieve en la porción centro oriental del SVT.

Orozco, H. M. (2010). Hacia una nueva cultura del agua en México: organización indígena y campesina. El caso de la presa Villa Victoria. *Ciencia Ergo Sum, 17*(1), 28-36. https://doi.org/http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10412443004.

Priego Santander, A. G. (2003). Tipos morfométricos del relieve. https://doi.org/htpp://www2.ine.gob.mx/

Priego, A. G. (2010). *Propuesta para la generación semiautomatizada*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Saavedra, D. (2021). *Prácticas agrícolas, cambio climático, sobrepastoreo, deforestación, modificación de su uso, algunas causas*. Gaceta UNAM.

Salinas Chávez, E.M. (2019). El estudio de los paisajes como fundamento para la evaluación del potencial turístico del municipio Paranaiba, Ms, Brasil. *GRAN TOUR, REVISTA DE INVESTIGACIONES TURÍSTICAS*. https://doi.org/https://eutm.es/grantour/index.php/grantour/article/view/91.

Tricart, J. (1977). Ecodinâmica. *IBGE-SUPREN (RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE)*.

Vera, J. D. (2023). Descripción de los parámetros de producción para incrementar el rendimiento en el cultivo de banano (Musa AAA) en el Ecuador. *Revista Universidad Técnica de Babahoyo.* https://doi.org/ http://dspace.utb.edu.ec/handle/49000/13864.

El Suelo: Pasado, Presente y Futuro de la Vida

División IV. El papel de los Suelos en la Sostenibilidad del Medio Ambiente y la Sociedad

COLECCIÓN CIENTÍFICA DE COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO "BIOCOSTRATECA"

Santiago Sánchez García[1]; Héctor Godínez Álvarez[1]; Jessica de Jesús Sosa Quintero[1]

[1] Laboratorio de Ecología, Unidad de Biotecnología y Prototipos, Facultad de Estudios Superiores Iztacala C.P. 54090, Tlalnepantla, México.

Correo autor de correspondencia: jessica_sosqui@comunidad.unam.mx

RESUMEN

Las colecciones científicas son reservorios de conocimiento, que conservan ejemplares a largo plazo y que proporcionan información para responder preguntas de diversas áreas del conocimiento como la biogeografía, fisiología, ecología, entre otras. La mayoría de las colecciones son zoológicas y botánicas, fundamentales para la investigación, educación, conservación y divulgación. Sin embargo, las colecciones del suelo o las que preservan componentes del suelo son escasas y poco conocidas. Las costras biológicas del suelo (biocostras) son un componente en la superficie del suelo de zonas áridas y semiáridas; estas comunidades edáficas están compuestas por cianobacterias, líquenes y briófitas, ejemplares que forman parte de colecciones científicas por separado. Por lo que la Colección Científica de Costras Biológicas del Suelo "BIOCOSTRAteca" es la primera colección científica en el país, que alberga a los principales componentes de estas comunidades edáficas, y cuya finalidad es conservar el material, después de un proceso de colecta, curación e identificación taxonómica. Actualmente la Colección de Biocostras en la Facultad de Estudios Superiores Iztacala de la Universidad Nacional Autónoma de México, es un reservorio de ejemplares para la consulta, desarrollo de proyectos de investigaciòn, para la docencia e impartición de talleres de divulgación; ya que las biocostras son un buen modelo de enseñanza para aprender sobre la diversidad del suelo y su funcionamiento en el ecosistema.

PALABRAS CLAVE: *Biocostras; Briofitas; Cianobacterias; Comunidades edáficas; Líquenes.*

INTRODUCCIÓN

Las costras biológicas del suelo o biocostras son comunidades edáficas que se desarrollan en los primeros centímetros del suelo. Las biocostras son altamente diversas, entre los principales organismos que las componen, son cianobacterias, líquenes y briófitas (Belnap *et al*., 2003). Asociadas a la gran diversidad, las biocostras realizan múltiples funciones en el ecosistema; participan en procesos hidrológicos, biogeoquímicos, ecológicos y edáficos (Weber *et al*., 2016). Las biocostras son un buen modelo ecológico y de enseñanza para entender los procesos en el ecosistema (Weber *et al*., 2016; López Rodríguez *et al*., 2020), procesos que dependen del grupo taxonómico dominante (Castillo y Maestre, 2011). Por ejemplo, biocostras dominadas por cianolíquenes fijan mayor nitrógeno que biocostras dominadas por cianobacterias o briófitas (Sosa-Quintero *et al*., 2023).

En México, las biocostras son un componente que cubre hasta el 80% de la superficie del suelo (Sosa-Quintero *et al*., 2022a). La reciente investigación en biocostras muestra que la determinación taxonómica no está completa para biocostras descritas en regiones del norte y centro de México (Sosa-Quintero *et al*., 2022b). Para incrementar y conservar información de la estructura de las biocostras, se estableció la primera Colección de Costras Biológicas del Suelo "BIOCOSTRAteca", la cual alberga ejemplares de cianobacterias, líquenes y briófitas de la zona semiárida de la Reserva de Tehuacán-Cuicatlán. La colección tiene la finalidad de integrar material húmedo y seco de los componentes de las biocostras, y ser una colección científica para la investigación, educación, conservación y divulgación. Se espera que la colección incorpore a largo plazo biocostras de todo el país para preservar la diversidad edáfica, promover la investigación colaborativa y ser un recurso para la enseñanza.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ejemplares de la Colección han sido parte de investigaciones sobre la ecología de biocostras en un periodo de 10 años, de muestras de la zona semiárida de la Reserva de la Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla. Las muestras fueron colectadas, curadas e identificadas taxonómicamente previo a la incorporación a la colección. Para la colecta se utilizaron nucleadores de 8 cm de diámetro, y con una espátula las biocostras se colocaron en cajas Petri y se transportaron al laboratorio. Posteriormente, se realizó el proceso de limpieza y curación para mantener la estructura de la biocostra. La identificación de cada uno de los componentes de las biocostras se realizó con claves especializadas de cianobacterias (Komarek y Anagnostidis, 2005; Komarek, 2003), briófitas (Sharp *et al*., 1994; Delgadillo y Cárdenas, 1990) y líquenes (McCune y Rosentreter, 2007; Nash *et al*., 2002). Las muestras fueron identificadas en el laboratorio de Ficología de la Facultad de Ciencias, y en las Colecciones de Briófitas y Líquenes del Herbario Nacional (MEXU) del Instituto de Biología UNAM, en donde un ejemplar de cada especie de líquen fue ingresado al Herbario Nacional. Posteriormente, los ejemplares identificados se integraron para formar la Colección de Costras Biológicas del Suelo "BIOCOSTRAteca" en el laboratorio de Ecología de la Unidad de Biotecnología y Prototipos de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La colección está conformada por muestras húmedas y secas de cada especie. En total hay 13 especies de cianobacterias, 12 líquenes y 11 especies de briófitas; 10 musgos y una hepática. Las especies de cianobacterias pertenecen a los géneros *Aphanocapsa, Aphanothece, Asterocapsa, Chroococcidiopsis, Chroococcus, Gleocapsa, Hormathonema Microcoleus, Microseira, Nostoc, Phormidium, Schizothrix y Scytonema.* Los líquenes están representados por los géneros *Enchylium, Endocarpon, Heppia, Peltula, Placidium, Placynthiella, Polychidium y Psora.* Las briófitas del género *Aloina, Brachymenium, Bryoerythrophyllum, Bryum, Didymodon, Fissidens, Pseudocrossidium y Riccia sp.* Las biocostras de la región son comunidades con ensamblajes únicos y diferentes de las biocostras de los desiertos de Norteamérica (Rivera-Aguilar *et al*., 2006). En esta zona del

país las biocostras son un componente fundamental en el ecosistema con múltiples funciones y con mayor número de especies identificadas (Sosa-Quintero *et al*., 2022b). Es por ello que, la colección en conjunto de los organismos de las biocostras permite preservar a largo plazo ejemplares para su consulta en investigaciones posteriores. Además, recientemente se ha utilizado a las biocostras de la colección para actividades de divulgación y como modelo para la enseñanza de la diversidad edáfica y ecología del suelo, con la finalidad de una formación integral (Carvajal *et al*., 2019).

CONCLUSIONES

La primera Colección de Costras Biológicas del suelo "BIOCOSTRAteca" integra ejemplares en seco y húmedos de cianobacterias, líquenes y briofitas de biocostras de la zona semiárida de Tehuacán- Cuicatlán, Puebla. La colección es un recurso que ha facilitado la identificación de las biocostras en diversas investigaciones, así como una parte fundamental para profundizar en su estudio, un recurso útil para la educación, conservación y divulgación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Dra. María de los Ángeles Herrera Campos, Dr. Claudio Delgadillo y al Dr. Gustavo Montejano Zurita, los especialistas de líquenes, briofitas y cianobacterias respectivamente; por las facilidades y asesoría en el proceso de identificación taxonómica de las especies.

BIBLIOGRAFÍA

Belnap, J., Büdel, B., & Lange, O. (2003). Biological soil crusts: characteristics and distribution, in: Belnap, J., Lange, O. (Eds.), Biological Soil Crusts: Structure, Function and Management. Springer-Verlag., Berlin, pp 3-30. 10.1007/978-3-642- 56475-8_1.

Carvajal, L., Gonzalez, J., Martinez, P. & Ramirez, V. (2019). Constructivism and learning by projects: environmental prospective strategies in the classroom of higher education. *Espacios, 40* (5), 18-27.

Castillo-Monroy, A. & Maestre, F. (2011). La costra biológica del suelo: Avances recientes en el conocimiento de su estructura y función ecológica. *Revista chilena de historia natural*, *84(1),* 1-21.

Delgadillo, C. & Cárdenas, S. (1990). Manual de Briofitas, second ed. Instituto de Biología,Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Komarek, J. (2003). Coccoid and colonial cyanobacteria. In: Wehr, J.D., Sheath, R.G. (Eds.), Freshwater Algae of North America, Ecology and Classification. Academic Press, Amsterdam, Netherlands, pp. 59–116, 10.1016/b978-012741550-5/50004-0.

Komarek, J. & Anagnostidis, K., (2005). Cyanoprokaryota. 2. Teil: Oscillatoriales. In: Büdel, B., G¨artner, G., Krienitz, L., Schagerl, M. (Eds.), Süßwasserflora von Mitteleuropa. Elsevier GmbH, München, pp. 1–759.

López-Rodríguez, M., Chamizo, S., Cantón, Y. & Rodríguez-Caballero, E. (2020). Identifying social–ecological gaps to promote biocrust conservation actions. *Web Ecology, 20*, 117–132.

McCune, B.P. & Rosentreter, R. (2007). Biotic soil crust lichens of the Columbia Basin. Monographs in North American Lichenology. Volume 1. Northwest Lichenologists, Corvallis, Oregon.

Nash III, T.H., Ryan, B.D., Gries, C. & Bungartz, F. (2002). Lichen flora of the Greater Sonoran Desert Region, Volume 1. Arizona State University Lichen Herbarium, Arizona, USA.

Rivera-Aguilar, V., Montejano, G., Rodríguez-Zaragoza, S. & Durán-Díaz, A. (2006). Distribution and composition of cyanobacteria, mosses and lichens of the Biological soil crusts of the Tehuacan Valley, Puebla, Mexico. *Journal of Arid Environmets, 7*, 208–225.

Sharp, A., Crum, H. & Eckel, P. (1994). The moss flora of Mèxico. Memoirs of the New York Botanical Garden, volume 69. New York, New York, USA.

Sosa-Quintero, J., Camargo-Ricalde, S. L., de los Ángeles Herrera-Campos, M., & Godínez-Alvarez, H. (2022). Rainfed agriculture and firewood extraction modify differently the taxonomic and functional structure of biocrusts in a tropical semiarid region. *Geoderma*, *406*, 115459.

Sosa-Quintero, J., Godínez-Alvarez, H., Camargo-Ricalde, S. L., Gutiérrez-Gutiérrez, M., Huber-Sannwald, E., Jiménez-Aguilar, A., ... & Rivera-Aguilar, V. (2022). Biocrusts in Mexican deserts and semideserts: a review of their species composition, ecology, and ecosystem function. *Journal of Arid Environments*, *199*, 104712.

Sosa-Quintero, J., García-Oliva, F. & Godínez-Alvarez, H. (2023). Rainfed agriculture and firewood extraction have contrasting changes on biocrust functional groups and soil N dynamics in a tropical dryland. *Journal of Arid Environments*, *208*, 104882.

Weber, B., Büdel, B., Belnap, J. (2016). Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands. Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0.

ANÁLISIS DE LA ENSEÑANZA DE LA CIENCIA DEL SUELO EN LA EDUCACIÓN BÁSICA Y MEDIA EN CHILE: COMPARATIVA 2018–2023

Juan Ortiz Contla[1]; Rocío E. Gallardo Jara[1]; Marcelo Panichini Panichini[2]; Mathias Kuschel Otárola[1]; Pedro Montesano de Souza Campos[2], Pablo Neira Vidal[3], Benjamín Sandoval Leal[4], Tatiana Francisca Escobar Hernández[1], Winfred Espejo Contreras[1], Eliana Pereyra[5], Manuel Antonio Casanova Pinto[6], Silvia Patricia Paredes Carrera[7], Inés Figueroa Cares[1], Erik Manuel Zagal Venegas[1], Mauricio Iván Schoebitz Cid[1], Analí Rosas Gajardo[1], Marco Sandoval Estrada[1], Neal Stolpe Lau[1]

[1] Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción, 3780000, Chillan, Chile.
[2] Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), 4880000, Vilcún, La Araucania, Chile.
[3] Institute de Recerca de la Biodiversitat (IRBio), Universitat de Barcelona, Spain.
[4] Facultad de Arquitectura, Geografía y Urbanismo, Universidad de Concepción, 4030000, Concepción, Chile.
[5] Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de la Pampa, Santa Rosa-La Pampa, 6300, Argentina.
[6] Departamento de Ingeniería y Suelos, Universidad de Chile, 8820808 Santiago, Chile
[7] Instituto Politécnico Nacional, Laboratorio de Nanomateriales Sustentables, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, Av. Instituto Politécnico Nacional S/N, Unidad Profesional Adolfo López Mateos, CDMX, CP 07708, México.

Correo del autor de correspondencia: rgallardo@udec.cl

RESUMEN

Es incuestionable el papel que desempeña el suelo en la regulación de innumerables procesos naturales, en la satisfacción de las demandas humanas, y como principal estrategia para mitigar el cambio climático. Sin embargo, su relevancia pasa prácticamente desapercibida para el público en general, siendo una causa principal de la limitada inclusión de la ciencia del suelo en etapas formativas. En este trabajo, se recopiló y sintetizó información relacionada con la presencia de la ciencia del suelo en libros de texto oficiales proporcionados por el Ministerio de Educación de Chile (MINEDUC) en los niveles escolares de enseñanza básica (EB) y media (EM), para los años 2018 y 2023. Se identificaron 56 y 71 textos disponibles para 20018 y 2023, respectivamente, así como 173 y 232 objetivos específicos que incluían «suelo» entre otros 36 términos relacionados. Los tópicos se agruparon en cuatro categorías u objetivos pedagógicos: i) conocimiento, ii) comprensión y iii) aplicación, y iv) otros; obteniendo un coeficiente de información del suelo (SIC) para estimar la calidad de la información disponible. Los resultados resaltan una actualización curricular global de la ciencia del suelo para cada categoría (+2.12%, -6.79%, +7.76, y -3.09%, respectivamente). Otros aspectos relevantes identificados fueron: i) el número de objetivos específicos disminuyó de EB a EM, ii) la información más completa se aborda en EB (6º año), iii) una reducción 2018→2023 del 6.79% de los contenidos de comprensión, iv) prevalencia de temas relacionados con la seguridad del suelo y la mitigación del cambio climático.

PALABRAS CLAVE: *Ciencias del Suelo; educación en Chile; enseñanza básica y media.*

INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, todas las culturas han mostrado interés por el conocimiento del suelo (Churchman, 2010). Los primeros estudios (~1800) fueron netamente descriptivos, evolucionando junto a disciplinas como geología, geoquímica, agroquímica, etc., para luego dar paso a un desarrollo del conocimiento sistematizado del concepto suelo, asentándose finalmente en seis sub-disciplinas principales: i) edafología, ii) mineralogía del suelo, iii) química del suelo, iv) física del suelo, v) biología del suelo y vi) fertilidad del suelo, todas ellas orientadas fundamentalmente a la productividad agrícola (Hartemink y McBratney, 2025; Robins, 2016). En los últimos años la evidencia experimental ha revelado: i) una relación entre procesos edáficos y la actividad humana asociada a procesos de degradación del recurso, que conducen a la actual crisis ambiental global (Olsson *et al.,* 2019), y ii) la importancia de considerar la variabilidad y tipos de suelo al realizar recomendaciones de uso, previniendo costos socio-económicos y medioambientales asociados (Kuzyakov y Zamanian, 2019).

Por otro lado, la investigación del suelo ha pasado a ser interdisciplinaria y formar parte de la agenda internacional como uno de los principales Objetivos de Desarrollo Sostenible (Brevik *et al*., 2015), hecho reflejado en el creciente número de publicaciones científicas y el factor de impacto de las revistas especializadas (Halvin *et al.,* 2010). En este sentido, el conocimiento público del suelo resulta trascendente, independientemente de la edad y tipo/nivel educativo, con el fin de desarrollar habilidades, concientizar, valorizar y sobre todo adquirir responsabilidad social ante cualquier experiencia relacionada con el suelo.

La educación formal temprana probablemente constituye la principal alternativa al profesionalizar métodos que promueven la calidad en la comprensión del conocimiento, desarrollando el uso de facultades críticas (Adesemowo y Sotonade, 2022). A pesar de existir un acuerdo generalizado respecto a que la ciencia del suelo es un requisito importante del plan de estudios básicos (EB) y medios (EM) (Hillel, 2008), los contenidos de edafología difieren de un país a otro, incluso dentro de sus regiones o provincias (Hayhoe *et al.,* 2016). En un estudio reciente realizado en 43 países, Chile se ubica en los últimos lugares en cuanto a procesos de conocimiento/comprensión de ciencia del suelo (fundamentos), mientras que lidera en conceptos de conciencia en degradación y protección (Charzyński *et al.,* 2022).

En este trabajo, se realiza un análisis comparativo de los recursos literarios escolares oficiales de Chile (EB y EM) para los años 2018 y 2023, con el objetivo de determinar y contrastar potenciales diferencias curriculares, y sistematizar los contenidos de la ciencia del suelo para cada año analizado.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una extensa revisión bibliográfica de textos escolares públicos de enseñanza básica y media, proporcionados por el Ministerio de Educación de Chile (MINEDUC)

para los años 2018 (56 textos escolares) y 2023 (71 textos escolares), además de recursos escolares complementarios. Las materias analizadas para el 2018, fueron: Biología, Ciencias Naturales, Historia, Geografía y Ciencias Sociales, Química y Física; y para el año 2023, a las anteriores se sumaron Ciencia para la Ciudadanía y Educación Ciudadana. Dentro de los textos consultados se identificó la palabra clave «suelo», entre otros 36 términos relacionados. Los resultados se agruparon en cuatro categorías o agrupación de objetivos específicos, según Charzyński *et al.* (2022): *i) conocimiento* (génesis del suelo, perfil del suelo, suelos del país, suelos del mundo, zonas climáticas-suelo-vegetación), *ii) comprensión* (procesos del suelo, funciones del suelo, utilidad agrícola), *iii) aplicación* (manejo del suelo, protección y degradación del suelo), y *iv) otros.* A estos datos descriptivos/cualitativos, se les asignó un puntaje o score (S=0–3) con base en la información disponible en los textos por tópico, como: 0: ninguna información disponible; 1: escasa información; 2: algo de información; 3: información completa. Sobre estos puntajes, se calculó el peso ponderado (Sw%) para cada categoría o grupo de objetivos específicos, y posteriormente un coeficiente de información del suelo SIC (para EB y EM), y SIC_T (SIC total por año analizado), para estimar el efecto combinado de las puntuaciones individuales de cada objetivo educativo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estructura Curricular Básica y Media. El sistema educacional en Chile se divide en dos etapas según rango etario: i) Enseñanza Básica (EB) (8 cursos, de 6 a 14 años), y ii) Enseñanza Media (EM) (4 cursos, de 14 a 18 años), con un programa curricular único a nivel nacional provisto por MINEDUC. La matrícula total de alumnos en el año 2023 alcanzó los 3,631,025, con un 67.8% para EB y 32.2% en EM (Arias *et al.,* 2023). En tanto, los centros educativos se dividen en 5 categorías: i) públicos/municipales (38.95%), ii) privada subvencionada (49.26%), iii) privados pagados (5.49%), iv) corporaciones de administración delegada (0.63%), y v) servicio local de educación (5.66%) (Arias *et al.,* 2023).

Ciencia del suelo en cursos, libros y textos complementarios. Se reconoció la presencia de la ciencia del suelo tanto en EB como en EM para los años 2018 y 2023, sin embargo, varía notablemente tanto el volumen de la información, como la especificidad del contenido analizado para cada año consultado. Los cursos y grados escolares en los que se reconoce la ciencia del suelo, tanto para Textos del Estudiante (TE) como Guías Docentes (GD), son: para 2018: i) Ciencias Naturales (CN: 1º– 8º grados EB); ii) Biología (B: 3º– 4º grados EM); iii) Historia, Geografía y Ciencias Sociales (HGSC: 1º– 8º grados EB y 1º– 4º grados EM); iv) Química (QUI: 1º– 4º grados EM); v) Física (FIS: 1º, 3– 4º grados EM). En tanto, para 2023, i) Ciencias Naturales (CN: 1º– 8º grados EB); ii) Biología (B: 1º– 2º grados EM); iii) Historia, Geografía y Ciencias Sociales (HGSC: 2º– 8º grados EB y 1º– 2º grados EM); iv) Química (QUI: 1º– 2º grados EM); v) Ciencia para la Ciudadanía (CC: 3º– 4º grados EM); vi) Educación Ciudadana (EC: 1º, 3– 4º grados EM). En los cursos y textos, se reconoce que para el 2023, el número de temas examinados en casi todos los cursos aumentó, con una prevalencia constante de lecciones dentro del contenido de EB sobre EM. En cuanto a los textos complementarios, se detectaron cuatro fuentes externas:

i) módulos con un enfoque investigativo: SOIL (Acuña *et al*., 2020); ii) temas relacionados con el suelo: Desentrañando los Dilemas del Suelo (Jiménez *et al*., 2024); iii) Aventuras Bajo Tierra (Fuentes y Huerta, 2010) y Ecolíderes: estrategias innovadoras para inculcar el respeto por el medio ambiente (Vliegenthart, 1998). La bibliografía secundaria observada es una importante herramienta pedagógica complementaria para los procesos de enseñanza-aprendizaje del suelo, tanto para los niveles de EB y EM, como incluso para el público en general. Examina con cierto detalle parte de los temas considerados inicialmente, incluyendo también actividades complementarias como excursiones, recolección y manipulación de muestras, determinaciones analíticas, etc.

Categorías y Objetivos Específicos analizados. El mayor volumen de conocimientos entregados referente al suelo, ocurre preferentemente entre 3º– 6º grados de EB y 1º grado de EM. En cuanto a objetivos específicos considerados por categoría, el resultado es el siguiente:

Conocimientos: en 2018 alcanza el 30.64% del currículo, con un aumento de 2.12% global para el año 2023. En cuanto a objetivos específicos considerados por categoría, el resultado es el siguiente: i) génesis de suelo aumentó un 32%, ii) perfil del suelo aumentó un 23%, iii) suelos del país aumentó un 11%, iv) suelos del mundo aumentó un 32%, y v) zonas climáticas-suelo-vegetación aumentó un 32%. *Comprensión:* se evidencia una variación negativa desde 31.79% para 2018 a 25% para el 2023, con una disminución de 6.79%. Específicamente: i) procesos del suelo aumentaron un 45%, ii) funciones del suelo disminuyeron un 52%, y iii) utilidad agrícola disminuyó un 47%. *Aplicación:* la variación porcentual para la categoría fue positiva, pasando de 25.43% para 2018 a 33.19% para 2023. El resultado de los objetivos específicos fue: i) el manejo del suelo aumentó un 73%, ii) la protección y la degradación del suelo aumentaron un 19%. *Otros:* la categoría registró una leve variación negativa de 3%, pasando de 12.14% en 2018 a 9.05% en 2023.

Asignación de coeficientes por categoría. En base a los 11 objetivos específicos y categorías, se destaca una gran variabilidad en la importancia conceptual de los términos analizados. La frecuencia con la que se menciona «suelo» y otros términos adyacentes no implica necesariamente un desarrollo conceptual completo, sino diferentes impactos temáticos, desde ser un tema central, de escasa importancia, hasta ser citados de forma aislada. A pesar de que los objetivos específicos son abordados tanto en la EB como en la EM para 2018 y 2023, no es hasta 5.º–6.º grados de EB donde se abarcan de manera central en los libros de texto, con relevancia de 6 de los 11 objetivos específicos. Entre estos objetivos recurrentes, con base en el índice SIC (min=0 y max=25), destacan: protección y degradación del suelo con valor de 22 en 2018 y 25 en 2023; utilidad agrícola con 14 para 2018 y 7 en 2023; funciones del suelo con valor de 17 en 2018 y 8 en 2023; temáticas consistentes con el cambio climático.

CONCLUSIONES

De los textos analizados, se reconoce un aumento del 26.78% en términos de recursos bibliográficos desde el periodo 2018 a 2023 (de 56 a 71). La presencia de la ciencia del suelo tanto en EB como en EM varía en volumen y especificidad de información para cada año. Tras clasificar la información en cuatro categorías fundamentales: i)

conocimiento, ii) comprensión, iii) aplicación y iv) otros, fue posible detectar cambios notables para cada período analizado. En 2018, en conjunto los objetivos específicos de protección y degradación del suelo, utilidad agrícola y funciones del suelo alcanzaron un 51% del currículo total, evidenciando prioridad hacia la sensibilización de los jóvenes sobre cuestiones relacionadas con la seguridad alimentaria y del suelo. Para 2023, se observó una diversificación en los objetivos específicos de los planes de estudio, alcanzando un promedio de 7% por objetivo, siendo protección y degradación del suelo el objetivo que prevaleció con un 27% en el programa general. Esto indica probablemente un enfoque hacia el desarrollo sostenible y la variabilidad del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

Acuña, T., Maldonado, L., Manríquez, N., Zapata, A. & Santana, J. (2020). Módulos con enfoque indagatorio – SUELO. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso Centro de Investigación en Didáctica de las Ciencias y Educación STEM (CIDSTEM). Santiago de Chile, 69 pp.

Adesemowo, P.O. & Sotonade, O.A. (2022). Basic of Education: the meaning and scope of education. Olabisi Onabanjo University.

Arias, P., Pérez, J., Prater, V. & Quiroz, J.P. (2023) Matrícula oficial 2023: Análisis de base matrícula por estudiante. Centro de Estudios MINEDUC, 77 pp. https://bibliotecadigital.mineduc.cl/bitstream/handle/20.500.12365/19640/APUNTES%2034_2023_fd01.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Brevik, E. C., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., Pereg, L., Quinton, J. N., Six, J., & Van Oost, K. (2015). The interdisciplinary nature of SOIL. *SOIL, 1*(1), 117-129. https://doi.org/10.5194/soil-1-117-2015.

Charzynski, P., Urbanska, M., Capra, G.F., Ganga, A., Holmes, et al. (2022). A global perspective on soil science education at third educational level; knowledge, practice, skills and challenges. *Geoderma*, *425*, 116053.

Churchman, G.J. (2010). The philosophical status of soil science. *Geoderma*, *157*(3–4), 214-221.

Fuentes, J.P. & Huerta, A. (2010). Aventura Bajo la Tierra: el Suelo un Sistema Vivo. Manual práctico para escolares. *Editorial Universitaria*, ISBN: 9789561122949, 103 p.

Havlin, J., Balster, N., Chapman, S., Ferris, D., Thompson, T., & Smith, T. (2010). Trends in Soil Science Education and Employment. *Soil Science Society of America Journal*, *74*(5), 1429-1432. https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0143.

Hayhoe, D., MacIntyre, J., & Bullock, S. (2016). Soil science education for Grades K–12 in Canada. *Canadian Journal of Soil Science, 96*(3), 336-345. https://doi.org/10.1139/cjss-2015-0079.

Hartemink, A.E. & McBratney, Alex. B. (2025). Defining 'soil science'. *Soil Security, 18,* 100176.

Hillel, D. (2008). Soil in the environment: Crucible of terrestrial life. *Elsevier/Academic Press*. Burlington, MA. 320 pp.

Jiménez, J.P., Acosta, K., Contreras, D. & Herrera, R. (2024). Problemáticas del suelo, "Desentrañando los dilemas del suelo". Ministerio de Educación (MINEDUC) y Universidad de Tarapacá, Arica, Chile, 74 pp.

Kuzyakov, Y., & Zamanian, K. (2019). Reviews and syntheses: Agropedogenesis – humankind as the sixth soil-forming factor and attractors of agricultural soil degradation, *Biogeosciences, 16,* 4783–4803.

Olsson, L., Barbosa, H., Bhadwal, S., Cowie, A., Delusca, K., Flores-Renteria, et al. (2019). Land Degradation. In: Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems, Lund University Centre for Sustainability Studies, 184 p.

Robins, C. R. (2016). Soils, Science, Society, and the Environment. En C. R. Robins, Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science. *Oxford University Press.* https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.69.

Vliegenthart, A. (1998). Ecolíderes: estrategias innovadoras para contagiar amor por el medio ambiente. Tomo I y II. Casa de la Paz. Cuerpo de Paz. Santiago, Chile. 69 pp.

CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE MICROORGANISMOS EN SUELO DE CULTIVO DE GRANADO (*Punica granatum* L.) EN CHILCUAUTLA, HIDALGO, MÉXICO

Roosevelt Rodríguez Amador[1]; Christopher Contreras Lopez[2]; Brenda Esmeralda Jiménez Villeda[1]; Marithza Guadalupe Ramírez Gerardo[1]

[1] Tecnológico Nacional de México, Campus Occidente del Estado de Hidalgo. Paseo del Agrarismo 2000, Carretera Mixquiahuala de Juárez, Hgo. C.P. 42700. Mixquiahuala de Juárez, Hgo. México.

[2] Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Ciudad del Conocimiento, carretera Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Col. Carboneras, C. P. 42184. Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

Correo del autor de correspondencia: mgramirez@itsoeh.edu.mx

RESUMEN

El cultivo de granado (*Punica granatum*) se ha adaptado en ciertas localidades dentro del Valle del Mezquital, Hidalgo, México, lo cual impacta de manera positiva porque el fruto se vende fresco o industrializado, contribuyendo a la economía de la región. Por tal razón, existe interés en mejorar las condiciones de producción. Se sabe que el suelo es un factor importante para que exista un rendimiento idóneo y que los microorganismos presentes en él juegan un papel importante. El objetivo planteado fue caracterizar morfológicamente los microrganismos del suelo como hongos y bacterias en suelo de cultivo de *P. granatum* en la localidad de Chilcuautla, Hidalgo. Para ello se realizaron muestreos de suelos en tres sitios (S) cerca de la raíz de los árboles. En agua peptonada (0.1%) se realizaron diluciones de suelo para seguir con siembras en cajas Petri con medios de cultivo agar método estándar para el estudio de bacterias y, agar papa y dextrosa para hongos, posteriormente se incubaron a 35 °C. Los resultados indicaron, con base en la descripción morfológica, la presencia de Aspergillus y Penicillium en uno de los sitios, caracterizado por una mayor humedad ambiental. En el caso de las bacterias, se encontraron en el suelo S1 Bacilos Gram+. En el suelo S2 se observaron bacilos Gram+ y Gram– y en el suelo S3 se registraron Bacilos Gram +. Se concluye que la caracterización morfológica indica de manera indirecta una baja diversidad de microorganismos edáficos presentes en el cultivo de *P. granatum.*

PALABRAS CLAVE: *Diversidad microbiana; microbiota edáfica; rizosfera*.

INTRODUCCIÓN

Las condiciones que experimenta el planeta como resultado del cambio climático promueven la conservación de cultivos mejor adaptados a ciertos escenarios como la escasez de agua y suelos de baja calidad nutricional. El árbol de granado (*Punica granatum* L.) representa en el Valle del Mezquital, en el Estado de Hidalgo, un cultivo que se ha adaptado a las condiciones climáticas y edáficas de ciertos municipios. De acuerdo con SIAP (2023), en el estado de Hidalgo se produjeron 6,882.30 toneladas de granada, sumándose de esta manera a los estados de Morelos y Guanajuato como los principales

con mayor aporte nacional. Para la región del Valle del Mezquital es importante conservar y promover este cultivo, pues, aunque su producción es temporal (agosto a septiembre), representa una entrada económica importante por su venta en fresco y en productos industrializados. Para mantener el cultivo de *P. granatum* es importante conocer las prácticas agrícolas idóneas, las necesidades nutrimentales, así como la diversidad microbiana edáfica asociada. Se sabe que la presencia de microorganismos en el suelo está influenciada por diversos factores climáticos, edáficos, biológicos, así como a las prácticas agrícolas (Mercado-Blanco, *et al.* 2018). Por otra parte, estudios realizados por Ravinanth *et al*. (2022) indican que la productividad agrícola de *P. granatum* se puede mejorar identificando la diversidad microbiana del suelo, sobre todo a aquellos organismos promotores del crecimiento, encontrando en abundancia Planctomycetes y Bacteroidetes, y especies como *Streptomyces indicus*, *Bradyrhizobium kalama-zoonensis*, y *Pseudomonas cellulosum*, de manera que Rosabal *et al.* (2021) consideran importante la presencia de microorganismos ya que esto puede ser indicativo de la salud del suelo. En el contexto regional, los estudios se han enfocado en bacterias, destacando su potencial como promotores del crecimiento en la rizosfera de árboles de granado, destacando la presencia de *Bacillus subtilis* y *Erwinia bilingea* en la zona de raíz (Campoy *et al*., 2020). Estudios realizados por Wu *et al*. (2025) han demostrado la presencia de una alta riqueza de hongos en plantas sanas de granado, estos hallazgos resaltan la relevancia de caracterizar microsistemas microbianos en suelos locales y su posible aplicación biotecnológica. El objetivo de la presente investigación fue caracterizar morfológicamente hongos y bacterias presentes en suelo de cultivo de granada en el municipio de Chilcuautla, en el Estado de Hidalgo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio y toma de muestras. El estudio se realizó en la comunidad de Chilcuautla, Hidalgo, México en tres sitios, el sitio uno (S1) ubicado a 20° 19´ 26" de latitud norte y 99° 13´44" longitud oeste) a una distancia de 300 m del río Tula, el sitio dos (S2), localizado a 20° 19´ 11" de latitud norte y 99° 15´49" longitud oeste y ubicado a 600 m de la cabecera del municipio y, el sitio tres (S3) a 20 ° 19´ 11" de latitud norte y 99° 14´49" longitud oeste, localizado en un pequeño cerro. El tipo de suelo presente en el sitio S1 es un Vertisol pélico, mientras que los sitios S2 y S3 corresponden a un faeozem calcárico (INEGI, 2007). El muestreo de suelo se realizó en junio de 2024. La toma de muestra fue en forma de zig-zag, identificando árboles de aproximadamente 1.5 m de altura. Se realizó una muestra compuesta de tres submuestras por árbol, tomadas de diferentes puntos cercanos a la raíz. Las muestras se transportaron en bolsas de polietileno al Laboratorio de Investigación II del Instituto Tecnológico Superior del Occidente del Estado de Hidalgo.

Análisis microbiológico. De 100 g de suelo tamizado (≤ 2 mm), se tomó 1 g de suelo en 10 mL de agua peptonada al 0.1%, a partir de esta dilución inicial se prepararon disoluciones seriadas hasta la dilución 10^{-5} por duplicado. Cada duplicado se sembró en medios de cultivo que se utilizan para el análisis microbiológico de muestras de suelo, los cuales son agar métodos estándar (AME) para bacterias y agar papa y dextrosa (APD)

para hongos; se agregaron 20 mL de cada medio de cultivo por cada caja Petri inoculada, mediante la técnica de vertido en placa. Posteriormente se incubaron por 24 h a 35 °C en el caso de bacterias y por 72 h a 25 °C para hongos. La caracterización morfológica se realizó mediante tinción de Gram para bacterias y tinción con azul de metileno para hongos, en tres colonias, además del recuento en placa a las 24 y 72 h, solamente se realizó para bacterias (Argüello-Navarro *et al.*, 2016). Las observaciones de las muestras se realizaron bajo microscopio óptico a 10x, 40x y 100x.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización morfológica de las colonias de hongos muestra las diferencias encontradas en cada sitio (Cuadro 1). Estas variaciones están asociadas a condiciones como el tipo de suelo de origen, la materia orgánica, propiedades físicas y químicas del suelo y al manejo del cultivo que se presenta en cada sitio muestreado (Guadarrama-Nonato *et al.*, 2018; Mercado-Blanco *et al.*, 2018).

Cuadro 1. Colonias de hongos observadas en tres sitios muestreados de suelo de *P. granatum.*

Sitio	Descripción	
S1	***Hongo 1***. Colonia oval con anillos de color verde limón y borde blanco, textura polvorienta algodonosa. Reverso amarillo degradándose a blanco hacia sus bordes. ***Hongo 2***. Colonia circular elevada de color gris pálido, de rápido crecimiento y textura algodonosa densa. Reverso color blanco crema con bordes filamentosos.	
S2	***Hongo 1***. Colonia circular de rápido crecimiento de color café oscuro y blanco, textura algodonosa. Reverso café negruzco ***Hongo 2***. Colonias tipo moho verdosas en algunos casos circular.	
S3	***Hongo 1.*** Colonia circular de color blanco, textura algodonosa aterciopelada, superficie elevada en el centro y disminuye hacia los bordes. Reverso color blanco crema intensa con borde filamentoso. No se detectó otro hongo.	

En el suelo S1 se encontraron los géneros *Aspergillus sp* y *Penicillium* (Figura 1), mientras que en el suelo (S2) encontró *Aspergillus sp.* En caso del suelo S3, solo se lograron identificar algunas estructuras similares a esporas y cabe mencionar que solo se identificó un crecimiento de hongo a diferencia de los demás sitios.

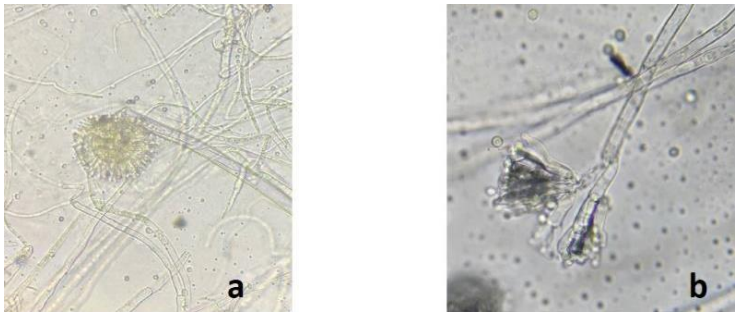


Figura 1. a. *Aspergillus sp* (40x), b. *Penicillium* (100x) observados en suelo S1 de cultivo de *P. granatum.*

Las unidades formadoras de colonias (UFC) fueron físicamente diferentes en los tres sitios (Figura 2). Los patrones en la descripción de las UFC presentaron elevación convexa, bordes redondeados, con forma circular, superficie lisa y de tamaño variable: la mayor cantidad de UFC fueron pequeñas, con un diámetro promedio de 1 a 5 milímetros; seguidas por colonias de tamaño medianas de 6 a 9 milímetros y en menor cantidad colonias de 1 cm de diámetro.

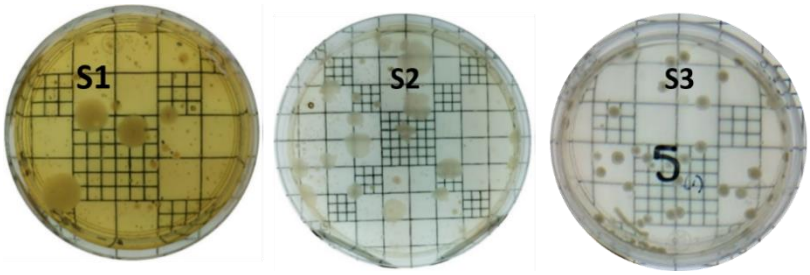


Figura 2. UFC en tres sitios muestreados de suelo de cultivo de *P. granatum.*

Las bacterias identificadas en el suelo S1 fueron Bacilos Gram+. En el suelo S2 se observaron bacilos Gram+ y Gram– y en el suelo S3 se registraron Bacilos Gram + (Figura 3). Aunque en la tinción de Gram se observan 2 formas de bacterias distintas de acuerdo con Argüello-Navarro *et al*. (2016) aun así la diversidad de bacterias se considera baja, una de las razones de esto se atribuye a la época del muestreo ya que aún no se comenzaba con los riegos ni había comenzado la época de precipitaciones pluviales, lo que coincide con lo reportado por Chen *et al.* (2023).

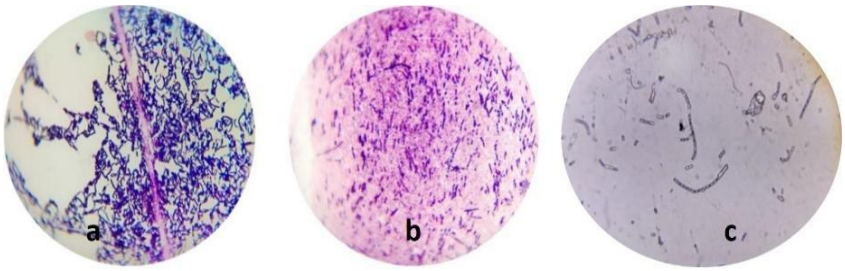


Figura 3. a) Bacilos Gram+, b) bacilos Gram+ y Gram– y c) Bacilos Gram+ en suelo de cultivo de *P. granatum* 100x campo claro.

CONCLUSIÓN

La caracterización morfológica de los microorganismos, hongos y bacterias presentes en el suelo de cultivo de *P. granatum* permitió identificar diferencias entre los microorganismos de los sitios muestreados. Por otra parte, de manera general se observa una diversidad baja en el suelo de *P. granatum*. Resalta la presencia de hongos *Aspergillus* y *Penicillium,* así como de bacilos Gram + y Gram - y en menor presencia cocos Gram + y Gram -.

BIBLIOGRAFÍA

Argüello-Navarro, N. A., Madiedo S. N., & Moreno R. (2016). Cuantificación de bacterias diazótrofas aisladas de suelos cacaoteros (*Theobroma cacao* L.), por la técnica de Número Mas Probable (NMP) *Revista Colombiana de Biotecnología,* 18(2), 40-47.

Campoy, E., Santana, A., Estrada, D., Estrada, J. C., Hernández, M. M., & Aguilar, I. (2020). Aislamiento e identificación de bacterias cultivables de la zona de raíz de granada roja (*Punica granatum*) en un huerto del Tephé Ixmiquilpan, Hidalgo, México. *Revista Tendencias en Docencia e investigación en Química* 6(6) 647- 653.

Chen, X., Wang, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Shen, Y., He, X., & Xiao, C. (2023). A Natural Moisture Gradient Affects Soil Fungal Communities on the South Shore of Hulun Lake, Inner Mongolia, China. *Journal of Fungi*, *9*(5), 549. https://doi.org/10.3390/jof9050549.

Guadarrama-Nonato, A., Mejía-Carranza, J. & M. Ramírez-Gerardo. (2018). *Acta Universitaria*, 28(2), 33-41. https://doi.org/10.15174/au.2018.1654.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Serie II, escala 1: 250 000 (Continuo Nacional). México. Consultad el 16 de julio, 2025, desde https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825235659.

Mercado-Blanco, J., Abrantes, I., Barra, A., Bevivino, A., Cianacio, A., Grenni, P., Hrykiewicz, K., Kredics, L. & D. Proenca. (2018). Belowground microbiota and the health of tree crops. Frontiers in Microbiology, 19. doi: 10.3389/fmicb.2018.01006.

Ravinanth, R., Das, A. J., Usha, T., Ramesh, N., & Middha, S. K. (2022). Targeted metagenome sequencing reveals the abundance of Planctomycetes and Bacteroidetes in the rhizosphere of pomegranate. *Archives of Microbiology, 204*(8), 481. https://doi.org/10.1007/s00203-022-03100-8.

Rosabal, L., Macías, P., Maza, M., López, R., & Guevara, F. (2021). Microorganismos del suelo y sus usos potenciales en la agricultura frente al escenario del cambio climático. *Magna Scientia UCEVA*, *1*(1), 104–117. https://doi.org/10.54502/msuceva.v1n1a14.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2023). *Producción agrícola nacional*. Consultada el 15 de julio, 2025, desde https://www.gob.mx/siap/documentos/produccion-agricola.

Wu Z, Chen J, Chen J, Yang Y, Zhou A, Wu J. (2025). The relationship between pomegranate root collar rot and the diversity of fungal communities in its rhizosphere. *Front Microbiol*. Mar 21; 16:1573724. doi: 10.3389/fmicb.2025.1573724. PMID: 40190735; PMCID: PMC11968712.

CARBONO ORGÁNICO EN SUELOS LUVISOLES DE UN GRADIENTE DE PERTUBACIÓN EN UN BOSQUE MESÓFILO DE MONTAÑA

Ariadna Alcibar Rosas[1]; María Magdalena Ayala Hernández[1]; Ramiro Ríos Gómez[1]

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Batalla 5 de Mayo S/N, Ejército de Oriente, Alcaldía Iztapalapa, CP. 09230, Ciudad de México, CDMX.

Correo del autor de correspondencia: riosarana44@gmail.com

RESUMEN

El bosque mesófilo de montaña es un ecosistema que ofrece servicios importantes para el desarrollo humano. Al ser un ecosistema benéfico, se ha utilizado de manera desmedida por varias actividades antropogénicas que crean un cambio en su calidad. Por otra parte, al evaluar el COS (Walkey-Black) profundidad efectiva (centímetros) y estructura (FAO) de los suelos, se encontró que el COS y la profundidad efectiva disminuyen con la profundidad y la estructura en la parte superficial se ve modificada de granular en perles b y c a poliédrica subangular en el perfil a. Al identificar los suelos de los tres sitios, se encontró el grupo de referencia Luvisols, pero difieren por la presencia del calificador Nudriargic que es exclusivo del perfil perturbado (a).

PALABRAS CLAVE: *Calidad; cambio de uso de suelo; COS; indicador; MO.*

INTRODUCCIÓN

En México, los Bosques Mesófilos de Montaña (BMM) constituyen cerca del 1%, considerando vegetación secundaria, o poco más de 0.4%, si se considera solo vegetación primaria (INEGI, 2007). Su distribución fragmentaria se limita a zonas montañosas con topografía de pendientes pronunciadas, en particular cañadas y zonas protegidas de radiación solar y vientos fuertes (Rzedowski, 1978).

A pesar de su distribución restringida, provee recursos como la captura de carbono que contribuye de manera significativa al enriquecimiento y desarrollo de los suelos debido a su descomposición (Challenger, 1998), al ser un ecosistema que ofrece estos recursos, se convierte en un ecosistema importante y vulnerable puesto que se ha utilizado de manera excesiva obteniendo cambios en la cobertura vegetal y uso de suelo (Rosas-Rangel *et al.*, 2019), deteriorando sus propiedades y una disminución en su calidad (Jacobo-Segura, 2017).

Para evaluar la calidad de los suelos en los bosques mesófilos, es necesario contar con indicadores, ya que revelan la productividad o funcionalidad del suelo al ambiente, e indican si este recurso natural mejora, permanece constante o decrece (Estrada-Herrera *et al*., 2017). Algunos ejemplos de indicadores pueden ser la densidad, materia orgánica (MO), carbono orgánico, entre otros.

El carbono orgánico del suelo (COS) se encuentra en residuos de plantas, animales y microorganismos en varias etapas de descomposición (Nava-Arzola, 2022). Realizando

funciones como el mantenimiento de la fertilidad, la conservación de la biodiversidad y la producción de alimentos, entre otros (Cortés, 2025), o convertirse en emisor de CO2 dependiendo de su uso y manejo (Pérez-Ramírez *et al*., 2013). Asociado a la MO, mejora propiedades como la retención de humedad, formación y estabilidad de agregados, capacidad de intercambio catiónico, almacenamiento y liberación de nutrimentos (Nava-Arzola, 2022).

De acuerdo con lo mencionado, el cambio de uso de suelo de zonas forestales a zonas agrícolas ha tenido un impacto negativo en la cantidad de carbono orgánico y en los servicios que proporciona el ecosistema. El objetivo de este estudio fue analizar la cantidad de carbono orgánico en el suelo, sus características físicas como profundidad efectiva y estructura, asimismo clasificarlos con base en la propuesta IUSS Working Group WRB (2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio fue llevado a cabo en Zapotitlán de Méndez, Puebla. Araiza-Vázquez *et al*., (2020) mencionan que se localiza entre 19° 58′ 10′′ y 20° 01′ 36′′ N y 97º 38' 36" y 97º 44' 24" O, a una altitud de 800-1400 m. Las altitudes de los tres perfiles fueron registradas de 779 m a 1370 m. Se realizó un trabajo de gabinete empleando Sistemas de Información Geográfica, QGIS versión 3.34 e información del INEGI con el fin de indicar el tipo y uso de suelo de la zona. Posteriormente, en el lugar se llevaron a cabo recorridos para elegir los sitios de muestreo, usando como indicadores de la perturbación: presencia de caminos, composición florística, estructura de la vegetación, tocones, arbolado con daños por instrumentos y presencia de especies cultivadas. De esta manera, los sitios fueron identificados como: a) perturbados, b) medianamente perturbados y c) sin perturbación.

Posteriormente se procedió a caracterizar ecológicamente el sitio, se hizo el perfil del suelo, se identificaron los horizontes, se describieron morfológicamente y se efectuaron las pruebas de fenolftaleína-NaF, peróxido de hidrógeno al 10% y ácido clorhídrico. Posteriormente, el suelo fue identificado con base en WRB versión 2022. Finalmente se tomaron muestras de cada horizonte para analizar el contenido de MO con el método de Walkley Black y el contenido de COS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Grupo de suelo de Referencia (GSR) con mayor presencia es el Luvisol y el menos representado es el Phaeozem (Figura 1a); la mayor área de superficie del municipio está cubierta por BMM con diferente grado de perturbación y ausencia de asentamientos humanos (Figura 1b). Durante tres recorridos y considerando el grado de perturbación, se seleccionaron los sitios a) perturbados, b) mediamente perturbados y c) sin perturbación (Figura 2).

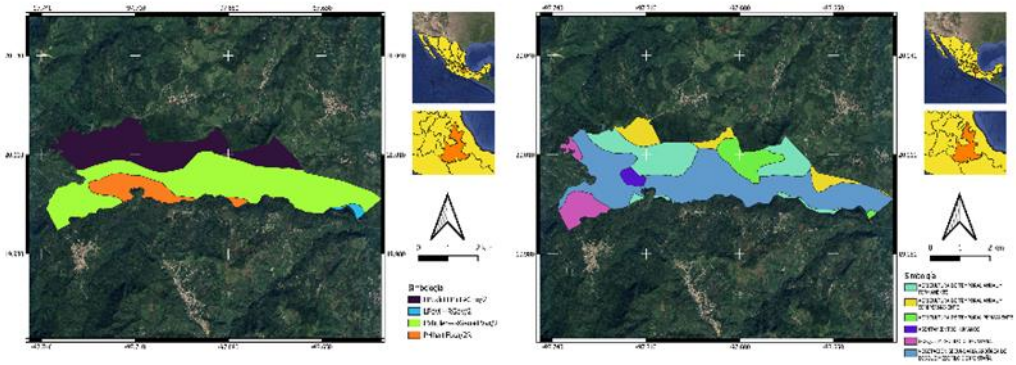


Figura 1. Mapas de: a) Tipo de suelo y b) usos de suelo y vegetación de Zapotitlán de Méndez, Puebla.



Figura 2. Bosque a) perturbado, b) medianamente perturbado y c) sin perturbación

La mayor profundidad es del perfil b, seguido del perfil c con el de menor profundidad es el del perfil a. De igual manera, se identificaron los horizontes donde el perfil a contiene mayor cantidad de arcilla en la superficie, a diferencia de los perfiles b y c, con respecto al contenido de raíces y profundidad efectiva, los perfiles b y c son más abundantes, viceversa del perfil a. Para el caso de los perfiles b y c), la estructura de ambos va de granular en la superficie a poliédrica subangular a lo largo del perfil, mientras que el perfil a va de poliédrica subangular a blocosa en el subsuelo. El material geológico de los perfiles b) y c) es más representativo puesto que se encuentra a altitudes mayores, en contraste con el perfil a).

Para el caso de las pruebas de fenolftaleína-NaF, peróxido de hidrógeno al 10% y HCl, en los tres perfiles las reacciones fueron fuertes excepto para la fenolftaleína-NaF. La identificación del suelo para cada uno de los tres sitios es la siguiente: a) Dolomitic, Nudriargic Luvisol (Clayic, Profundic), b) Dolomitic, Skeletic, Chromic, Luvisol (Clayic, Profundic), y c) Dolomitic, Skeletic, Chromic Luvisol (Clayic, Humic, Hypereutric). Los perfiles b) y c) presentan más calificadores primarios y suplementarios en comparación con el perfil a) (Figura 3).

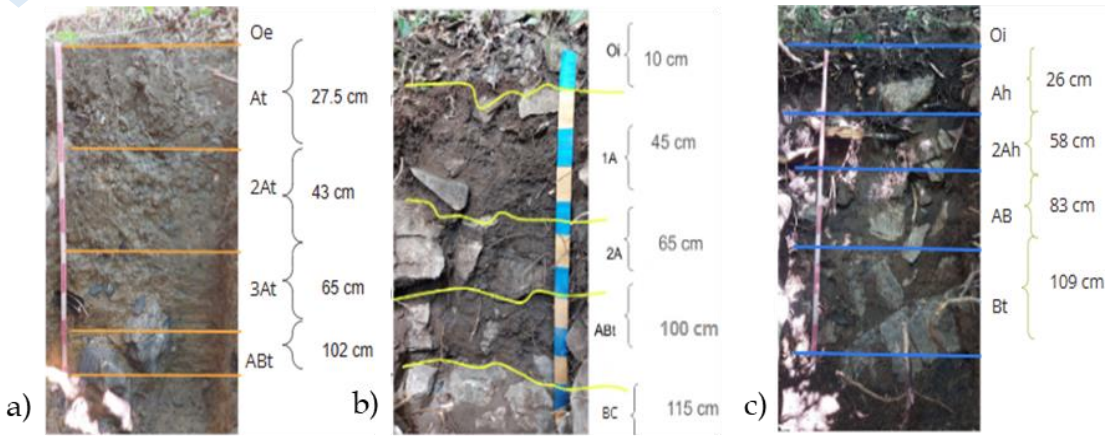


Figura 3. Identificación de los horizontes y profundidad de los perfiles: a) perturbado zona de cafetal, b) medianamente perturbado y c) sin perturbación.

En el perfil perturbado y el no perturbado, la cantidad de MO disminuye con la profundidad, mientras que en el medianamente perturbado aumenta con la profundidad; sin embargo, el suelo sin perturbación contiene más CO (Cuadro 1).

Cuadro 1. Porcentaje de materia orgánica y contenido de carbono orgánico en cada horizonte de los Luvisols estudiados.

Perfil	Horizonte	Profundidad (cm)	Densidad Aparente (g cm^3)	Materia Orgánica (%)	Carbono Orgánico (Mg/ha)
Perturbado	At	0-27.5	1.06	4.20	71.07
	2At	27.5-43	1.08	2.34	22.74
	4At	43-65	1.09	1.74	24.22
	ABT	65-102	1.16	0.78	19.43
Medianamente perturbado	1A	0-45	0.99	3.42	88.25
	2A	45-65	1.01	4.88	57.16
	ABt	65-103	1.02	4.30	96.93
	BC	103-106	1.05	8.16	14.91
Sin perturbación	Ah	0-26	1.05	9.67	154.54
	2Ah	26-58	1.08	4.26	85.46
	AB	58-83	1.09	2.94	46.50
	Bt	83-109	1.16	1.68	29.41

Se encontró que, al aumentar la profundidad del perfil, disminuye el contenido de COS en el suelo, lo cual fortalece la estructura y la profundidad efectiva, haciendo al suelo menos susceptible a compactarse como lo menciona González *et al*. (2009), además, señala que los suelos arcillosos son especialmente propensos a sufrir compactación, tal como ocurre en los perfiles del estudio. López *et al.* (2020), en su estudio, observaron una tendencia de disminución del contenido de materia orgánica, además el contenido de COS tiene una tendencia similar a los estudios realizados en esta investigación. Respecto

al uso de suelo, el contenido de COS es mayor que en el perfil sin perturbación, a diferencia del perfil con perturbación, como señala Castillo-Pacheco *et al.* (2016).

CONCLUSIONES

El contenido de carbono orgánico en el suelo disminuye con el gradiente de perturbación; en este mismo sentido, se reduce la profundidad efectiva y el estado de conservación de la estructura granular. En cuanto al nombramiento de cada suelo, el nombre del grupo estudiado es Luvisol que se caracteriza por un enriquecimiento de arcilla, el calificador principal Dolomitic es el que está presente en los tres perfiles, en el perfil a presenta el calificador Nudriargic como diferenciador de los perfiles b y c, y en el perfil b se diferencia por sus calificadores secundarios como Humic e Hypereutric.

BIBLIOGRAFÍA

Castillo-Pacheco, L. A., Bojórquez-Serrano, J. I., Hernández-Jiménez, A., & García-Paredes, D. (2016). Contenidos de carbono orgánico en suelos bajo diferentes coberturas vegetales y de cultivo. *Cultivos Tropicales*, 37(3), 72-78.

Challenger A. (1998). Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. UNAM Agrupación Sierra Madre, S. C. México, CDMX. 847 pp.

Cortés, M. L. C., Cruz, R. M., Marín, J. F. R., Guier, F. A., Arroyo, D. C., Ruiz, A. G. S., Herrera, M. F., Poveda, P. P., Ramírez, M. F. & Campos, D. M. (2025). Almacenamiento de carbono orgánico del suelo bajo coberturas de pastos y plantaciones forestales jóvenes de Tectona grandis Lf y Gmelina arborea Robx. en la Región Huetar Norte, Costa Rica. *Environment & Technology*, 6(1), 1-38.

Estrada-Herrera, R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz, J., Navarro-Garza,H. & Etchevers-Barra (2017). Indicadores de Calidad del suelo para su Fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), pp. 813-831

González C. O., Iglesias C. C. E., & Herrera S. M. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 18*(2), 57–63.

INEGI. (2007). Carta de uso de suelo y vegetación. Serie IV, escala 1: 250 000. México.

IUSS Working Group (2022). Word Reference Base for Soil Resources: International Soil Classification System for naming soils and creating legends for soil maps (4th ed). International Union of Soil Sciences (IUSS). Vienna. Austria.

Jacobo-Segura, D. L. (2019). Alteraciones físicas, químicas y biológicas en suelos fragmentados de bosque mesófilo de montaña por actividades de cambio de uso de suelo. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales.

López H. A., Astroz C. A. M., & Silva P. A. (2020). Uso de la tierra y su influencia en la compactación del suelo en el Oriente de Columbia. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos*, 11(1), 34-53.

Nava-Arzola N. E. (2002) Respuesta del carbono edáfico y actividad microbiana del suelo ante diferente tipo de manejo en agroecosistemas tradicional del suelo de la Ciudad de México. Universidad Nacional Autónoma de México. México, CDMX. Posgrado en Ciencias Biológicas.

Pérez-Ramírez, S., Ramírez, M. I., Jaramillo-López, P. F., & Bautista, F. (2013). Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 19*(1), 5–14.

Rosas-Rangel, D. M., Mendoza, M. E., Gómez-Tagle, A., & Tobón-Marín, C. (2019). Avances y desafíos en el conocimiento de los bosques mesófilos de montaña de México. Madera y Bosques. 25(1).

Rzedowski J. (1978). Vegetación de México. México, CDMX. Limusa.

CAMBIO CLIMÁTICO Y CAMBIO DE USO DE SUELO: ¿CÓMO IMPACTAN SOBRE LA EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO?

María Lourdes González Arqueros[1]; Armando Navarrete Segueda[2]; Liliana García Romero[3], Erna Martha López Granados[4]

[1] SECIHTI– Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, 58030, Morelia, Michoacán, México.
[2] Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, 58190, Morelia, Michoacán, México.
[3] Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, 58030, Morelia, Michoacán, México.
[4] Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, 58030, Morelia, Michoacán, México.

Corro del autor de correspondencia: lourdes.gonar@gmail.com

RESUMEN

La fuerte presión ambiental derivada del cambio climático y del cambio de uso de suelo ha intensificado el proceso de erosión hídrica del suelo. Este fenómeno representa una amenaza crítica tanto para la sostenibilidad ambiental como para la seguridad hídrica de México, al reducir la fertilidad del suelo, limitar la infiltración de agua, aumentar la escorrentía, entre otros. El objetivo del estudio fue cuantificar y mapear el riesgo de erosión hídrica mediante la ecuación RUSLE y evaluar escenarios futuros de cambio climático y uso del suelo en una cuenca periurbana de la ciudad de Morelia, Michoacán. Se emplearon datos geoespaciales y meteorológicos, junto con proyecciones climáticas (RCP 4.5 y 8.5) y escenarios agrícolas basados en la expansión del cultivo de aguacate. Los resultados evidencian que el 18% del territorio produce el 73% de la pérdida de suelo actual. Bajo escenarios futuros, especialmente el RCP 4.5 a corto plazo, la pérdida se incrementaría hasta en un 24%. Se estima la pérdida completa del primer horizonte del suelo en menos de 20 años en condiciones combinadas de cambio climático y uso del suelo, lo que implica una reducción significativa del carbono orgánico y un aumento de emisiones de CO_2 del 20 al 24%. Se concluye que la combinación de cambio climático y expansión agrícola sin planificación adecuada acelera la erosión hídrica y compromete la capacidad productiva y la disponibilidad hídrica futura. Por lo que se requieren estrategias urgentes de manejo sostenible del territorio para mitigar estos efectos.

PALABRAS CLAVE: *Carbono orgánico; emisiones CO_2; geopedología; impactos socioambientales; modelación RUSLE.*

INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica del suelo es uno de los procesos de degradación más extendidos a nivel global, intensificada por el cambio de uso del suelo (CUS) y los efectos del cambio climático. La conversión de áreas naturales, como bosques, a usos agrícolas ha reducido

la cobertura vegetal protectora, facilitando la pérdida de suelo superficial y alterando profundamente sus funciones ecosistémicas.

Esta situación afecta no solo la calidad y funcionalidad del suelo, a través de la pérdida de fertilidad (Bertoni *et al*., 1985), disminución del carbono orgánico, compactación y pérdida de biodiversidad, sino también al ciclo hidrológico, al reducir la infiltración y la recarga de acuíferos, e incrementar la escorrentía superficial y la producción de sedimentos (Morgan, 2005).

Este fenómeno se agrava en zonas con laderas, climas estacionales y escasa cobertura vegetal, condiciones comunes en muchas regiones vulnerables de México (Morgan, 2005). A nivel global, se estima que una cuarta parte de los suelos están degradados, y la erosión hídrica es una de las principales causas de esta condición. En América Latina, más del 25% de los suelos se encuentran afectados, poniendo en riesgo la capacidad productiva, el abastecimiento de agua y la resiliencia ante el cambio climático (FAO, 2019).

Frente a este panorama, se vuelve esencial comprender y anticipar los patrones de erosión hídrica mediante herramientas científicas que integren factores biofísicos y humanos (Lal, 2001). La evaluación de la erodabilidad del suelo y el uso de modelos predictivos como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE) (Renard *et al*., 1997), combinados con Sistemas de Información Geográfica, permiten cuantificar la pérdida de suelo y mapear áreas de riesgo. Estos enfoques integrados ofrecen una base sólida para la toma de decisiones en la planificación territorial, el diseño de estrategias de conservación, la mitigación de los impactos socioambientales derivados de la pérdida de suelo y el aumento de la resiliencia de los territorios frente al cambio climático.

En este contexto, se plantea cuantificar y mapear el riesgo de erosión hídrica en la cuenca de la presa de Cointzio, mediante el uso de la ecuación RUSLE y herramientas de sistemas de información geográfica, integrando escenarios actuales y futuros de uso del suelo y clima, con el fin de evaluar cómo la pérdida de suelo impacta sobre la pérdida de fertilidad y la emisión de CO_2 a la atmósfera.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la cuenca de la presa de Cointzio se delimitaron unidades de paisaje considerando factores formadores del suelo con énfasis en la erosión hídrica. Se utilizaron datos litológicos, edafológicos, topográficos, climáticos, de vegetación y de uso y manejo del suelo. Con base en el enfoque geopedológico (Zinck, 2015) se definieron catenas representativas a través de análisis morfométricos y herramientas de Sistemas de Información Geográfica, complementados con verificación en campo. Posteriormente, se describieron perfiles de suelo y se recolectaron muestras para evaluar propiedades físicas y químicas como textura, materia orgánica, pH, densidad aparente y capacidad de infiltración, empleando metodologías estandarizadas en campo y laboratorio (Soil Science Division Staff, 2017).

La modelación de la erosión hídrica se realizó a nivel de cuenca mediante la aplicación de RUSLE (Renard *et al*., 1997), considerando cinco factores biofísicos, excepto el de prácticas de conservación. Esta modelación permitió identificar áreas de riesgo de erosión y analizar su relación con procesos de ladera y producción de sedimentos. Para evaluar

el efecto del cambio climático y del cambio de uso de suelo sobre la erosión, se generaron escenarios con proyecciones climáticas basadas en datos validados (Guajardo-Panes *et al*., 2017). Se aplicaron pruebas estadísticas para asegurar la calidad de las series meteorológicas utilizadas. Las proyecciones se obtuvieron a partir de modelos climáticos globales y su regionalización mediante modelos de circulación regional, centrándose en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para tres horizontes temporales, corto (2015-2039), mediano (2045-2069) y largo plazo (2075-2099). El modelo climático seleccionado fue el MPI-ESM-LR, por su mejor ajuste con los datos históricos de la zona.

Los criterios que se consideraron para los escenarios de cambio de uso de suelo fueron cambio a cultivo de aguacate que cumplan los siguientes requerimientos: altitudes entre 800 y 2,650 msnm (Burgos *et al*., 2011); suelos Andosoles y Luvisoles (INEGI, 2007); contenido de materia orgánica <5%; texturas desde arenosas hasta franco-arcillosas; buena estructura; buen drenaje; pH entre 5.5 y 6.5; temperaturas mínimas entre 10-17 °C y temperaturas máximas entre 28-33 °C (SAGARPA, 2011); pendiente máxima de 45%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de la erosión hídrica actual y potencial mostró que, en el escenario actual, la mayor parte del área presenta tasas de erosión entre 0.5 y 5 t/ha/año (29% del área) (Figura 1A), y contribuye con el 1% de la pérdida total de suelo. En contraste, las áreas con tasas mayores a 200 t/ha/año, aunque representan solo el 18% de la superficie, generan el 73% de la pérdida de suelo total. Este patrón concuerda con la dinámica no lineal de la erosión hídrica, donde pequeñas áreas críticas pueden dominar las exportaciones de sedimento (Poesen, 2018). El escenario potencial, que representa condiciones extremas sin cobertura vegetal, muestra que el 67% de la superficie presenta tasas mayores a 200 t/ha/año, concentrando el 94% de la pérdida de suelo total, lo que refleja la función esencial de la cobertura vegetal como barrera física y biológica contra la erosión (Morgan, 2005).

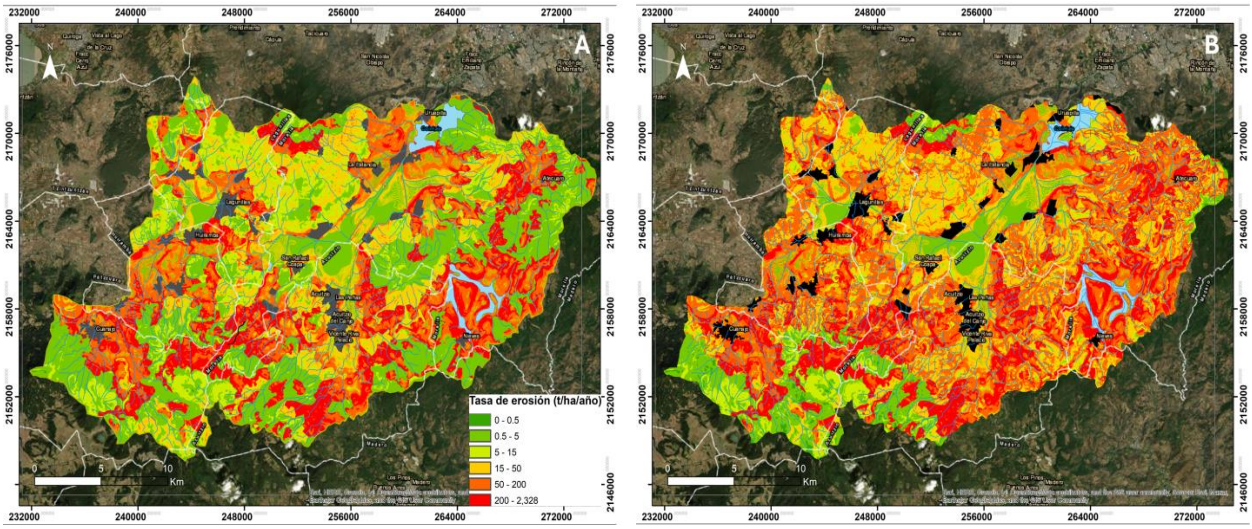


Figura 1. Predicción del riesgo de erosión hídrica del suelo. A) Escenario actual. B) Escenario bajo cambio de uso de suelo y RCP 4.5 periodo 2015-2039.

La cuenca presenta una alta vulnerabilidad al CUS, particularmente en áreas actualmente ocupadas por vegetación secundaria, pastizales y bosques de pino-encino; en conjunto, el 35.8% de la superficie de la cuenca es susceptible de presentar CUS (Cuadro 1). Estudios previos han demostrado que la sustitución de cobertura forestal por usos agropecuarios intensivos incrementa exponencialmente la susceptibilidad a la pérdida de suelo (Lal, 2001).

Cuadro 1. Superficie de las clases de uso de suelo y vegetación de la cuenca de la presa de Cointzio potenciales de experimentar cambio de uso de suelo.

Uso de suelo y vegetación	Área (ha)	Área (%)	Variación CUS (%)
Bosque	6,984	10.5	-15.0
Vegetación secundaria	1,250	1.9	-15.5
Pastizal	160	0.2	-5.2
Agrícola	32,369	48.5	0.0
Cuerpo de agua	896	1.3	0.0
Urbano	1,222	1.8	0.0
CUS (Bosque)	10,002	15.0	
CUS (Veg. secundaria)	10,376	15.5	35.8
CUS (Pastizal)	3,494	5.2	

Se identificó el contenido de materia orgánica de los suelos; el contenido máximo fue de 14.7% (en bosque de pino-encino), mientras que el mínimo se encontró en suelos agrícolas con un 5.5%. El promedio ponderado fue de 8.8%. En el segundo horizonte, los valores fluctuaron entre 12.1% y 0.7%, con un promedio de 5.1%. Esta disminución con la profundidad es consistente con la distribución vertical típica de la materia orgánica (Jobbágy *et al*., 2000) y refleja la degradación acelerada en áreas agrícolas.

La modelación que combina el cambio climático con el cambio de uso de suelo muestra que el escenario más desfavorable es el RCP 4.5 periodo 2015-2039 (Figura 1B) y que el horizonte superficial del suelo podría erosionarse por completo en tan solo 19 años, reduciendo significativamente la fertilidad del suelo, con una disminución promedio de 3.7 % en el contenido de materia orgánica. La pérdida de materia orgánica no solo afectaría la fertilidad, la estructura y el ciclo de nutrientes, comprometiendo la productividad, sino que reduciría la capacidad de secuestro de carbono del suelo, exacerbando retroalimentaciones positivas al cambio climático (Amundson *et al*., 2015).

Actualmente, se estima una pérdida de 328,112 toneladas de carbono orgánico por año, equivalentes a 1,202,204 toneladas de CO_2. En los escenarios de mayor impacto (CUS + RCP), estas emisiones podrían aumentar hasta entre 1,440,627 y 1,490,697 toneladas de CO_2 anuales, lo que representa un incremento de entre 19.8% y 24%. Este rango es comparable con estimaciones globales para sistemas de montaña con intensificación agrícola (Lugato *et al*., 2014).

CONCLUSIONES

El estudio subraya la necesidad de adoptar estrategias de manejo sostenible del suelo y de mitigación ante el cambio climático para preservar la funcionalidad ecológica y productiva de la cuenca. Asimismo, demuestra que la pérdida de suelo está directamente influenciada por los cambios en el uso del suelo y las variaciones en la precipitación. Estos factores afectan tanto la intensidad como la distribución espacial del riesgo de erosión. El escenario más crítico corresponde al pronóstico climático RCP 4.5 para el periodo 2015–2039, con un incremento del 24% en la pérdida total de suelo respecto a las condiciones actuales. Las áreas más vulnerables se ubican principalmente en terrenos agrícolas con poca pendiente, especialmente en zonas de cultivo de aguacate. Esta erosión conlleva una pérdida significativa de materia orgánica, lo que deteriora la fertilidad del suelo, reduce la infiltración del agua, limita la recarga del acuífero y contribuye al cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

M.L. González-Arqueros agradece al ICTI por el financiamiento a través del proyecto ICTI-PICIR-008. A. Navarrete-Segueda agradece a la SECIHTI por la beca "Estancias Posdoctorales por México-Académica convocatoria 2022 (1)" y a la UNAM por el financiamiento a través del apoyo IN213922. L. García-Romero expresa su agradecimiento a la SECIHTI por el apoyo durante su estancia de posdoctorado.

BIBLIOGRAFÍA

Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E. & Sparks, D. L. (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science,* 348(6235). doi: 10.1126/science.1261071

Bertoni, J., & Neto, L. (1985). Conservaçao do solo. Piracicaba. Livroceres.

Burgos, A., Anaya, C. & Solorio, I. (2011). Impacto ecológico del Cultivo de Aguacate a nivel regional y de parcela en el Estado de Michoacán: Definición de una Tipología de Productores. Morelia, Michoacán.

FAO. (2019). Detengamos la erosión del suelo para garantizar la seguridad alimentaria en el futuro.

Guajardo-Panes, R. A., Granados-Ramírez, G. R., Sánchez-Cohen, I., Díaz-Padilla, G., Barbosa-Moreno, F., Guajardo-Panes, R. A., Granados-Ramírez, G. R., Sánchez-Cohen, I., Díaz-Padilla, G. & Barbosa-Moreno, F. (2017). Validación espacial de datos climatológicos y pruebas de homogeneidad: caso Veracruz, México. *Tecnología y Ciencias del Agua,* 8(5), 157–177. doi: 10.24850/J-TYCA-2017-05-11

INEGI. (2007). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico. Escala 1:250,000 Serie II. Continuo Nacional Morelia.

Jobbágy, E. G. & Jackson, R. B. (2000). The vertical distribution of organic soil carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications,* 10(2), 423–436. doi: 10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2

Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development,* 12, 519–539. doi: 10.1002/ldr.472

Lugato, E., Bampa, F., Panagos, P., Montanarella, L. & Jones, A. (2014). Potential carbon sequestration of European arable soils estimated by modelling a comprehensive set of management practices. *Global Change Biology,* 20(11), 3557–3567. doi: 110.1111/gcb.12551

Morgan, R. C. P. (2005). Soil erosion and conservation (Third). Victoria, Australia: Blackwell Publishing Ltd.

Poesen, J. (2018). Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surface Processes and Landforms,* 43(1), 64–84. doi: 10.1002/ESP.4250

Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K. & Yode, D. C. (1997). Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation. RUSLE. Washington, D.C.: United States Government Printing.

SAGARPA. (2011). Aguacate. Monografía de cultivos. Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios.

Soil Science Division Staff. (2017). Soil Survey Manual (C. Ditzler, K. Scheffe, & H. C. Monger, Eds.; USDA Handb). Washington, D.C.: Government Printing Office.

Zinck, J. A. (2015). The geopedologic approach. Geopedology: An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies, 27–59. doi: 10.1007/978-3-319-19159-1_4.

ALMACENES DE NUTRIENTES EN SUELO DE MANGLARES: INFLUENCIA DE LA ZONA URBANA Y DE LA ESPECIE

Virginia Santana Pérez[1]; Bruno M. Chávez Vergara[2]; Daniel Pech[1]; Ángel E. Bravo Monzón[3]; Felipe García Oliva[4]; Pauline Santana Pérez[1]; María J. Solís Chan[1]; Cristina Montiel González[1]

[1] Laboratorio BIOMARCCA, El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Campeche, Av. Rancho Polígono 2-A Col. Ciudad industrial, CP 24500 Lerma, Campeche, México.

[2] Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Ciudad de México CP 04500, México.

[3] Universidad de la Ciénega del Estado de Michoacán de Ocampo, Sahuayo, Michoacán, México.

[4]Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES), Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia Antigua Carretera a Pátzcuaro No. 8701, CP 58190, Morelia, Michoacán, México.

Correo del autor de correspondencia: cristina.montiel@ecosur.mx

RESUMEN

En el contexto actual de cambio global, los manglares han sido reconocidos por su capacidad para almacenar carbono orgánico, especialmente en el suelo. Las especies vegetales que habitan estos ambientes presentan adaptaciones únicas para soportar condiciones extremas, y cada especie tiene capacidades para el uso, transporte y almacenamiento de nutrientes como el carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P). Resulta relevante realizar estudios que consideren la influencia humana sobre los ecosistemas naturales y que analicen la variación de los almacenes de nutrientes bajo dicha presión. Los resultados obtenidos mostraron comportamientos diferentes según el nutriente analizado. Para el caso del almacén de Corg en suelo a 20 cm, sin importar la cercanía a la zona urbana *Avicennia germinans fue* mayor que en *Rhizophora mangle*. El Carbono inorgánico, NT y PT mostraron una influencia en la cercanía a la zona urbana con valores más altos, evidenciando un gradiente en el cual, el almacenamiento disminuyó conforme se pronunciaba la distancia a la zona urbana. Lo cual podría explicarse por el aporte de externo posiblemente asociado a actividades humanas y a la presencia de sustrato más inorgánico producto de la erosión del suelo.

PALABRAS CLAVE: *Almacenes de nutrientes; Avicennia germinans; Carbono azul; Concentración de nutrientes; Rhizophora mangle*

INTRODUCCIÓN

Los suelos de los manglares han sido objeto de estudio por las altas tasas de secuestro de carbono que superan a ecosistemas terrestres, ya que el ambiente en el que se desarrollan permite el almacenamiento de carbono orgánico en forma de materia orgánica en descomposición durante periodos prolongados (Alongi, 2014). Asimismo, estabilizan sedimentos, evitando la erosión costera y poseen la capacidad de filtrar y retener contaminantes, antes de que lleguen a cuerpos de agua abiertos, lo que mejora la calidad del agua y contribuye a la salud de los ecosistemas marinos (Alongi, 2018; Kitheka *et al.*, 2003). Debido a estos atributos, los suelos de los manglares son considerados

elementos clave para la conservación de la biodiversidad y como pilares en las estrategias de adaptación al cambio climático. La expansión urbana cerca de estos ecosistemas es un fenómeno común y se ha documentado una relación entre la cercanía a zonas urbanas y la degradación de los manglares. En el estado de Campeche, México, el crecimiento poblacional ha impactado negativamente en estos ecosistemas. Aunque sus efectos no siempre son evidentes en la biomasa vegetal, sí se ha observado una disminución en el almacenamiento de carbono orgánico en el suelo (Hernández-Nava *et al.*, 2022). Por lo que se ven afectados en la capacidad para funcionar como sumideros de carbono. En los manglares las especies vegetales presentan diferentes estrategias de adaptación a su medio, estas diferencias podrían ser un factor que afecte el ciclo de nutrientes como C, N y P. La morfología, estrategias de absorción de nutrientes y tasas de descomposición de las hojas entre especies pueden influir en la dinámica del suelo y la disponibilidad de nutrientes (Reef *et al.*, 2010). Comprender la variación en el almacenamiento de nutrientes (C, N, P) en los suelos de manglar, en relación con la distancia a zonas urbanas y la especie dominante, resulta fundamental para orientar estrategias efectivas de conservación, manejo y restauración ecológica de estos ecosistemas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El muestreo se realizó durante la segunda semana de octubre de 2024 en la zona de manglar de la Reserva de la Biosfera de Los Petenes (RBLP). Esta reserva cuenta con una superficie de 282,857.62 hectáreas y se ubica en el estado de Campeche, en las coordenadas 20°11′ N y 90°32′O, en la parte occidental de la Península de Yucatán, México (Comisión Nacional Forestal, 2022).

Muestreo. Se seleccionaron tres sitios que representan manglares de tipo franja dentro del área de la RBLP. El primer sitio "El Cuyo" se encuentra aproximadamente a 10 km de la mancha urbana (Ciudad de San Francisco de Campeche), el segundo sitio "Balantauché" se encuentra a una distancia de 22 km de la zona urbana y el tercer sitio "Jaina" se encuentra a 34 km de la zona urbana. Dentro de los transectos delimitados en cada manglar de franja, se colocaron cuadrantes de 10 por 10 m con dominancia de cada especie, *R. mangle* y *A. germinans*. En cada cuadrante, se tomaron dos núcleos de suelo en cada punto al interior del cuadrante, mediante la introducción a percusión de un nucleador de PVC de 2 pulgadas de diámetro y 50 cm de largo. Con ayuda de un émbolo, el material fue extraído cuidadosamente hasta obtener un núcleo completo. El núcleo de suelo fue cortado a 20 cm de profundidad (de la parte superficial a la profunda) y se almacenó y transportó en hielo hasta el procesamiento en el laboratorio. De los dos núcleos tomados en cada punto, uno fue destinado al análisis de nutrientes (C, N y P), el otro se utilizó para la determinación de la densidad aparente y; porcentaje de humedad.

Análisis de humedad y densidad aparente. Se determinó el porcentaje de humedad de las muestras de suelo a través del método gravimétrico ajustado a temperatura constante de 70°C por 72 h. Para cada muestra, se registró el peso fresco (PF) y el peso seco (PS) y se realizó el siguiente cálculo:

$$\%\, humedad = ((PF - PS)/PF) * 100$$

Con los datos del peso seco (masa seca), se determinó la densidad aparente (∂aparente) en las muestras tomadas a 20 cm de profundidad en nucleado de 2 pulgadas de diámetro. Se realizaron los siguientes cálculos:

$$\partial aparente(g\ cm^{-3}) = \frac{peso\ seco\ del\ suelo(g)}{Volumen\ del\ suelo\ (cm^3)}$$

$$volumen\ del\ suelo = (\pi r^2)(h)$$

Análisis de nutrientes. En todas las muestras, las diferentes formas de carbono se determinaron en un analizador elemental tipo TOC (UIC, modelo CM5017), con medición colorimétrica. La determinación de carbono orgánico (Corg) se realizó con la resta de los datos del CT menor los datos del CI. Para determinar el carbono total (CT) en suelo se introdujo la muestra en un horno de combustión a 950° C en un analizador elemental tipo TOC y se midió el CT por el principio del método coulométrico. Para el carbono inorgánico (CI) en las muestras de suelo se realizó un análisis elemental tipo TOC por el principio del método coulométrico. Para la cuantificación de la concentración de nitrógeno y fósforo totales se utilizó el método de digestión ácida en Semi-Kjendahl para la obtención de las formas totales de nitrógeno y fósforo de las muestras suelo (Murphy y Riley, 1962).

Análisis de datos. Para calcular los almacenes de C, N y P en el suelo, se utilizaron los datos de concentración de nutrientes (mg·g) junto con la densidad aparente del suelo (g/cm³), obteniendo así los valores en g·cm². Posteriormente, estos datos fueron extrapolados a Mg/ha. Para evaluar los efectos principales e interacciones entre factores, se empleó la prueba *Aligned Rank Transform* (ART) en el software R (v. 4.5.0) y RStudio (versión Mariposa Orchid). Se aplicó un modelo ART para los contenidos de nutrientes en suelo, considerando como factores el sitio, la especie y su interacción. Cuando se detectaron diferencias significativas, se realizaron comparaciones post hoc mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El almacén de carbono orgánico (Corg) mostró diferencias significativas en el factor especie ($p < 0.05$). La prueba Tukey reveló contenidos más altos en *A.germinans* (93.1 Mg/ha) y significativamente más bajos en *R. mangle* (86.3 Mg $h^{-1}a$). Una posible explicación de este comportamiento podría deberse a las características de la materia orgánica que aporta cada especie. Por ejemplo, se observó en estudios (Mamidala *et al.,* 2023; Sierra-Rozo *et al.,* 2009) donde se comparó el almacén de Corg en suelo de dos especies de manglar, el mantillo de *A. germinans*, presentó mayores concentraciones de N y P y menores relaciones C/N y C/P, lo cual favorece la descomposición y el aporte de C al suelo, mientras que el de *R. mangle* fue recalcitrante por su alto contenido de carbono estructural y taninos.

Otros estudios (Noguchi *et al.,* 2020; Pérez-Ceballos *et al.,* 2018) mostraron que *A. germinans* presenta un sistema radicular superficial con mayor producción de raíces finas, que aportan Corg y se descomponen lentamente, favoreciendo el aumento en el almacén de carbono en el suelo. Por otro lado, factores abióticos como la salinidad también

influyen, incrementando la producción de raíces finas y reduciendo su descomposición, lo que aumenta el Corg del suelo (Zhang *et al.,* 2021). En cuanto al almacén de nitrógeno total (NT), las pruebas Tukey mostraron diferencias asociadas al factor sitio en donde el sitio más cercano a la zona urbana presentó los contenidos más altos (10.1 Mg/ha) posiblemente por aportes urbanos como aguas residuales y pluviales, fenómeno reportado en manglares periurbanos de Puerto Rico (Wigand *et al.,* 2021).

De igual forma, el fósforo total (PT) y el carbono inorgánico (CI) presentaron valores más altos cerca de la urbe y disminuyeron con la distancia. En la Península de Yucatán, el sustrato kárstico rico en $CaCO_3$ favorece la precipitación del fósforo con Ca^{2+}, reduciendo su disponibilidad biológica (Estrada Medina *et al.,* 2019). La actividad humana puede inducir eutrofización y cambios en la disponibilidad del fósforo en el suelo. En sitios impactados por efluentes se ha observado mayor acumulación de PT inorgánico y reducción de fracciones orgánicas de C y P, debido al aumento de la actividad microbiana y a la descomposición acelerada de la materia orgánica (Nóbrega *et al.,* 2014).

Cuadro 1. Contenido de nutrientes (Mg/ha) en suelo de tres manglares de la Reserva de la Biosfera de los Petenes con diferentes especies dominantes.

	ART			**El Cuyo**		**Balantauché**		**Jaina**	
Variable	S	Sp	S.sp	*R. mangle*	*A. germinans*	*R. mangle*	*A. germinans*	*R. mangle*	*A. germinans*
CI_{stock}	*	n.s.	n.s.	54.2 (9.95–65.7)	39.3 (37.3–51.3)	0.09 (0.07–0.10)	39.8 (0.48–49.9)	0.11 (0.07–55.5)	0.10 (0.08–0.12)
$Corg_{stock}$	n.s.	*	n.s.	62.2 (51.7–97.3)	95.9 (81–120)	86.7 (84.7–91.7)	93.1 (83.1–112)	86.3 (76.8–91.3)	92.3 (87.4–101)
NT_{stock}	*	n.s.	n.s.	13.9 (8.93–15.3)	6.14 (6.01–11.2)	3.6 (1.69–4.66)	10.6 (2.28–15.8)	2.42 (2–8.8)	2.61 (2.1–2.78)
PT_{stock}	*	**	**	0.12^{Aa} (0.09–0.14)	1.17^{Aa} (0.26–1.68)	0.025^{Ab} (0.017–0.038)	0.088^{Aa} (0.073–0.098)	0.005^{Ab} (0.002–0.064)	0.016^{Ab} (0.004–0.02)

Notas: Los valores corresponden a la mediana (Q1–Q3). Significancia en el modelo ART para: S=efecto sitio; sp=efecto especie; S.sp=interacción sitio por especie. Abreviaciones: CI: carbono inorgánico; Corg: carbono orgánico; NT: nitrógeno total; y PT: fósforo total.

CONCLUSIONES

El suelo bajo dos especies de manglar presenta diferencias en el tamaño del almacén de nutrientes como el carbono orgánico a 20 cm de profundidad. En este estudio, se observó que, sin importar la distancia a la zona urbana, el suelo bajo *A. germinans* presentó el almacén más alto de este nutriente. En comparación, nutrientes como CI, NT y PT sí presentaron una relación con la cercanía a la zona urbana, mostrando una disminución conforme aumentó la distancia a la urbe. Lo que podría estar relacionado a la importación de nutrientes por parte de la ciudad y a una mayor erosión del suelo en

las inmediaciones. En conjunto, nuestros resultados sugieren que la alta capacidad de almacenamiento de Corg en *A. germinans* pudiera deberse las características de la materia orgánica, mientras que los aportes urbanos modifican la dinámica de N y P en el suelo de manglar.

BIBLIOGRAFÍA

Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, *6*, 195–219. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020.

Alongi, D. M. (2018). Impact of global change on nutrient dynamics in Mangrove Forests. In *Forests* (Vol. 9, Issue 10). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/f9100596.

Comisión Nacional Forestal. (2022). *Programa Operativo Estatal de Sanidad Forestal 2022*. https://sivicoff.cnf.gob.mx/ContenidoPublico/02%20Informes%20de%20acciones%20operativas/DiagnosticosEstatales/2022/Campeche.pdf.

Estrada Medina, H., Jiménez Osornio, J. J., Álvarez-Rivera, O., Barrientos Medina, R. C., Estrada Medina, H., Jiménez Osornio, J. J., Álvarez Rivera, O., & Barrientos Medina, R. C. (2019). El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología. *Acta Universitaria*, *29*, 1–18. https://doi.org/10.15174/au.2019.2292.

Hernández-Nava, J., Pascual-Barrera, A. E., Zaldívar-Jiménez, A., Pérez-Ceballos, R., Hernández-Nava, J., Pascual-Barrera, A. E., Zaldívar-Jiménez, A., & Pérez-Ceballos, R. (2022). Estructura y secuestro de carbono en manglares urbanos, fundamentos para su conservación en Isla del Carmen, Campeche, México. *Botanical Sciences*, *100*(4), 899–911. https://doi.org/10.17129/botsci.3048.

Mamidala, H. P., Ganguly, D., Purvaja, R., Singh, G., Das, S., Rao, M. N., Kazip Ys, A., Arumugam, K., & Ramesh, R. (2023). Interspecific variations in leaf litter decomposition and nutrient release from tropical mangroves. *Journal of Environmental Management*, *328*, 116902. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.116902.

Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, *27*(C), 31–36. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5.

Nóbrega, G. N., Otero, X. L., Macías, F., & Ferreira, T. O. (2014). Phosphorus geochemistry in a Brazilian semiarid mangrove soil affected by shrimp farm effluents. *Environmental Monitoring and Assessment*, *186*(9), 5749–5762. https://doi.org/10.1007/s10661-014-3817-3.

Noguchi, K., Poungparn, S., Umnouysin, S., Patanaponpaiboon, P., Duangnamol, D., Yoneda, R., Utsugi, H., Sato, T., & Tabuchi, R. (2020). *Biomass and Production Rates of Fine Roots in Two Mangrove Stands in Southern Thailand*. https://www.

Pérez-Ceballos, R., Echeverría-Ávila, S., Zaldívar-Jiménez, A., Zaldívar-Jiménez, T., & Herrera-Silveira, J. (2017). Contribución del hidroperiodo y la microtopografía a la regeneración natural de Avicennia germinans en un sitio de restauración ecológica. *Ciencias Marinas*, *43*(1). https://doi.org/10.7773/cm.v43i1.2683.

Reef, R., Feller, I. C., & Lovelock, C. E. (2010). Nutrition of mangroves. In *Tree Physiology* (Vol. 30, Issue 9, pp. 1148–1160). https://doi.org/10.1093/treephys/tpq048.

Sierra-Rozo, O., Ernesto, J., Pineda, M., Santos-Martínez, A., & Co, J. E. (2009). *Velocidad de descomposición de la hojarasca en diferentes sustratos de manglar durante la época de lluvias en San Andrés Isla, Caribe Colombiano*.

Wigand, C., Oczkowski, A. J., Branoff, B. L., Eagle, M., Hanson, A., Martin, R. M., Balogh, S., Miller, K. M., Huertas, E., Loffredo, J., & Watson, E. B. (2021). Recent Nitrogen Storage and Accumulation Rates in Mangrove Soils Exceed Historic Rates in the Urbanized San Juan Bay Estuary (Puerto Rico, United States). *Frontiers in Forests and Global Change*, *4*. https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.765896.

Zhang, Y., Xiao, L., Guan, D., Chen, Y., Motelica-Heino, M., Peng, Y., & Lee, S. Y. (2021). The role of mangrove fine root production and decomposition on soil organic carbon component ratios. *Ecological Indicators*, *125*, 107525. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.107525.

BIOFRAGMENTACIÓN DE MICROPLÁSTICOS EN SEDIMENTOS DE ARROYOS DEL SURESTE DE COAHUILA, MÉXICO

Salma Verónica Murguia Fierro[1]; Martha Elena Rivas Aguilar[1]; Fabián Fernández Luqueño[2]

[1] Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Unidad Saltillo, 25900, Ramos Arizpe, México.
[2] Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Unidad Zacatenco, 07360, Ciudad de México, México.

Correo del autor de correspondencia: veronica.murguia@cinvestav.mx

RESUMEN

El incremento de residuos plásticos en el medio ambiente constituye una problemática de contaminación a escala global. En este estudio, se muestrearon sedimentos de arroyos ubicados al sureste de Coahuila, México y se expusieron a distintos sustratos (fertilizantes, lombricomposta y nanopartículas de óxido de zinc), con el objetivo de estimular el crecimiento de microorganismos autóctonos y favorecer la biodegradación de microplásticos (MP). Los sedimentos tratados se incubaron durante 90 días a 27 °C. Mediante microscopía electrónica de barrido se observó la formación de una biopelícula sobre MP de polietileno, lo que sugiere la presencia de cepas nativas capaces de colonizar y biodegradar los MP.

PALABRAS CLAVE: *Biodegradación; Bioestimulación; Biorremediación; Microorganismo; Plástico.*

INTRODUCCIÓN

En 2022 la producción global de plástico fue de 400.3 millones de toneladas (Lee *et al.*, 2024). El 79% de los residuos plásticos terminan en los ecosistemas, lo que resulta en una problemática ambiental (Zaman y Newman, 2021). Debido a factores bióticos y abióticos, estos residuos plásticos se fragmentan en partículas menores de 5 mm denominadas microplásticos (MP). Los MP ingresan al ambiente por actividades antropogénicas de forma directa o indirecta; se transportan y acumulan por circulación natural y pueden adherirse a plantas, rocas o sedimentos provocando una alteración y daño a los ecosistemas como modificaciones en las propiedades fisicoquímicas del suelo, inhibición de crecimiento de microorganismos, daño en el sistema respiratorio humano, entre otros (Lee *et al.*, 2024; Sun *et al.*, 2023).

Una estrategia tecnológica de remediación de entornos contaminados es la biorremediación; esta se basa en la descomposición o transformación de los compuestos contaminantes mediante la degradación microbiana. La bioestimulación (BS) es un tipo de biorremediación que generalmente implica la adición de nutrientes o sustratos (Anjum *et al.*, 2017). En la biodegradación, varios tipos de plástico son degradados por microorganismos y descomponedores, como actinomicetos, algas, bacterias, hongos y otros, debido a la capacidad de estos para sintetizar enzimas intracelulares y

extracelulares que ayudan en la descomposición de los polímeros. Todo el proceso de degradación microbiana se resume en cuatro etapas esenciales: i) Biodeterioro o colonización, en esta etapa los microorganismos se adhieren a la superficie de los plásticos formando una biopelícula y liberando enzimas extracelulares. ii) Biofragmentación o depolimerización, los polímeros son fragmentados a monómeros, dímeros y oligómeros. iii) Asimilación: los fragmentos plásticos son absorbidos y asimilados por los microorganismos para generar energía, biomasa, metabolitos primarios y secundarios. iv) Mineralización: todos los compuestos biodegradables son consumidos por los microorganismos formando CO_2, H_2O, CH_4, entre otros (Maddela *et al.*, 2023).

Diversos investigadores han comenzado a estudiar la influencia de las biopelículas en la degradación de los MP como un método de biodegradación ecológico (Ganesan *et al.*, 2022; Sarkhel *et al.*, 2020). Ganesan *et al.* (2022) infirieron que la formación de biopelículas puede causar cambios fisicoquímicos en los MP. En otra investigación, se demostró que la glucosa, aplicada como fuente externa de carbono, mejora la degradación de los MP en comparación con las biopelículas naturales (Shabbir *et al.*, 2020). Por otra parte, investigadores infieren que, a tiempos más prolongados de exposición, los plásticos son más colonizados y por lo tanto hay mayor oportunidad de degradación con la pérdida de peso (Huang *et al.*, 2021). En su investigación, Ali e*t al.* (2021) mencionan que los residuos plásticos pueden ser degradados con mayor eficiencia por consorcios microbianos; sin embargo, hacen énfasis en que este campo de investigación no ha sido ampliamente explorado como la degradación del plástico por cepas microbianas individuales. Las investigaciones anteriores se han enfocado en la degradación de diferentes plásticos. Sin embargo, el enfoque ha sido la degradación de los plásticos a través de cepas microbianas puras sin aplicación de la BS. En consecuencia, el objetivo de este estudio fue evaluar la biofragmentación de los MP mediante la bioestimulación de sedimentos fluviales del sureste de Coahuila.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en tres arroyos ubicados en las ciudades de Saltillo, Ramos Arizpe y Arteaga, en Coahuila de Zaragoza. La localización geográfica de los sitios de muestreo se presenta en la Tabla 1. El muestreo fue realizado de forma aleatoria; se recolectaron tres muestras en la capa superficial del sedimento a una profundidad de 0 a 15 cm de cada sitio. Las muestras recolectadas se transportaron al laboratorio, fueron secadas a temperatura ambiente por tres días y posteriormente se almacenaron hasta su uso.

Cuadro 1. Localización geográfica de los sitios de muestreo.

Sitio de muestreo	Coordenadas
P1 – Arroyo "El Pueblo"	25.56211 LN, -100.94717 LO
P2 – Arroyo "Arteaga"	25.44666 LN, -100.85355 LO
P3 – Arroyo "La encantada"	25.70004 LN, -100.99013 LO

LN = Latitud Norte. LO = Longitud Oeste.

Para reactivar a los microorganismos presentes, los sedimentos se preincubaron por tres días y posteriormente, los sedimentos reactivados fueron acondicionados con fertilizantes, lombricomposta y nanopartículas de óxido de zinc (T-Chem, T-compost, T-Nano, respectivamente) y se incubaron 90 días en una cámara de crecimiento (intelligent light incubator PGX-1500 A) a 27°C. A los 0, 45 y 90 días de incubación se realizó un muestreo destructivo en el cual se realizó una extracción manual de MP con pinzas y un estereoscopio (HG887194). Los MP extraídos se fijaron con un buffer fosfato salino al 4% de formaldehído por 2 horas a temperatura ambiente. Después, se enjuagaron con un buffer fosfato y fueron expuestos a un gradiente de etanol (50, 65, 80 y 95%) durante 30 minutos (Allemann *et al.*, 2024). La formación de la biopelícula en la superficie de los MP fue analizada empleando un microscopio electrónico (SEM) de barrido de emisión de campo (EDS) Philips xl30 ESEM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el análisis mediante microscopía electrónica de barrido se identificó la presencia de microorganismos adheridos a la superficie del MP. Diversos estudios han demostrado una estrecha relación entre el crecimiento de microorganismos en la superficie del plástico y la formación de biopelículas (Gunawan *et al.*, 2020). En la Figura 1 se observaron cocos adheridos a la superficie de una película de polietileno, lo que sugiere que microorganismos autóctonos de los sedimentos utilizaron el polímero como fuente de carbono, iniciando así la primera fase de su biodegradación.

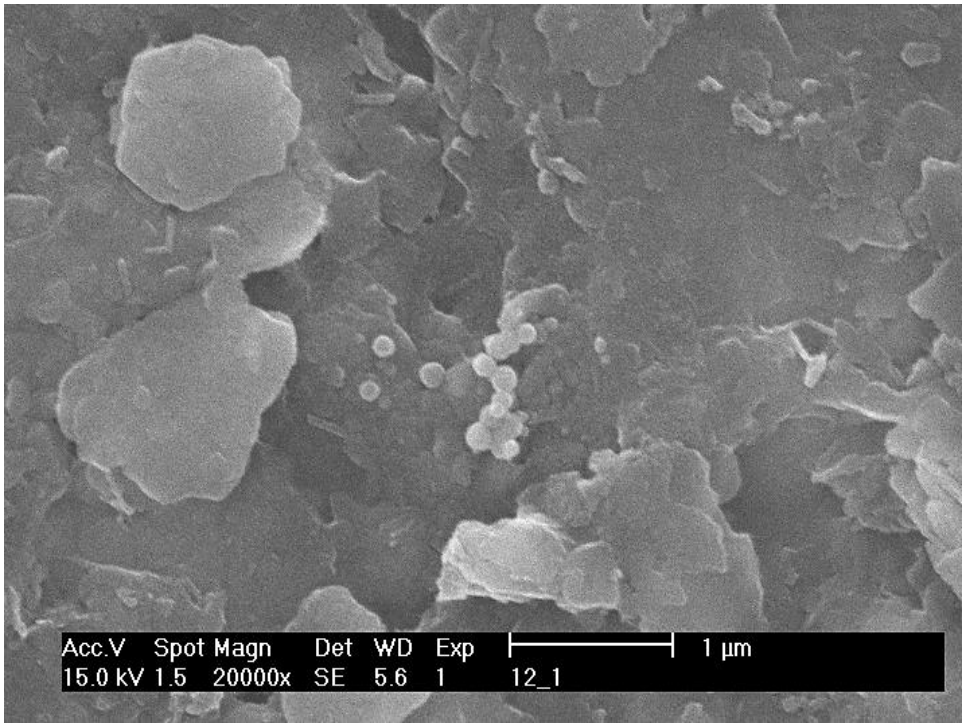


Figura 1. Micrografía de la adhesión de microorganismos en la superficie de una película de polietileno extraída a los 45 días de incubación del sitio P1 T-Chem tomada a 20000×.

Los microorganismos autóctonos del sitio de muestreo colonizaron la superficie de la película de polietileno al paso de 45 días de incubación. En su investigación, José y Jordao (2020) concluyeron que el polietileno de alta densidad (HDPE) es una buena superficie para el desarrollo de biopelículas bacterianas.

En la Figura 2 se observó una biopelícula desarrollada sobre una película de polipropileno al paso de 90 días de incubación. Investigadores concluyen que la formación de biopelículas en la superficie de los plásticos desempeña un papel clave en su biodegradación (Das & Kumar, 2013; Hadad *et al.*, 2005).



Figura 2. Micrografía de la adhesión de microorganismos en la superficie de una película de polipropileno extraída a los 90 días de incubación del sitio P2 T-Compost tomada a 20000×.

CONCLUSIONES

Los microplásticos (MP) tienen biopelículas que contribuyen a su degradación, como se observó tras 45 y 90 días de incubación. Esta evidencia sugiere la presencia de cepas nativas de microorganismos en los sedimentos muestreados, las cuales participan en la biofragmentación y degradación de los MP.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Martha Elena Rivas Aguilar, al Cinvestav Unidad Saltillo y a la SECIHTI.

BIBLIOGRAFÍA

Ali, S. S., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Zhu, D., Mahmoud, Y. A. G., Koutra, E., Metwally, M. A., Kornaros, M., & Sun, J. (2021). Plastic wastes biodegradation: Mechanisms, challenges and future prospects. *Science of the Total Environment,* 780, 146590. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146590.

Allemann, M. N., Tessman, M., Reindel, J., Scofield, G. B., Evans, P., Pomeroy, R. S., Burkart, M. D., Mayfield, S. P. & Simkovsky, R. (2024). Rapid biodegradation of microplastics generated from bio-based thermoplastic polyurethane. *Scientific Reports*, 14(1), 1–10. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56492-6.

Anjum, N. A., Gill, S. S. & Tuteja, N. (2017). Enhancing cleanup of environmental pollutants. In Enhancing Cleanup of Environmental Pollutants (Vol. 1). https://doi.org/10.1007/978-3-319-55426-6.

Das, M. P., & Kumar, S. (2013). Influence of cell surface hydrophobicity in colonization and biofilm formation on LDPE biodegradation. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 5(4), 3–7.

Ganesan, S., Ruendee, T., Kimura, S. Y., Chawengkijwanich, C. & Janjaroen, D. (2022). Effect of biofilm formation on different types of plastic shopping bags: Structural and physicochemical properties. *Environmental Research,* 206(September 2021), 112542. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112542.

Gunawan, N. R., Tessman, M., Schreiman, A. C., Simkovsky, R., Samoylov, A. A., Neelakantan, N. K., Bemis, T. A., Burkart, M. D., Pomeroy, R. S. & Mayfield, S. P. (2020). Rapid biodegradation of renewable polyurethane foams with identification of associated microorganisms and decomposition products. *Bioresource Technology Reports,* 11(July), 100513. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100513.

Hadad, D., Geresh, S. & Sivan, A. (2005). Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium Brevibacillus borstelensis. *Journal of Applied Microbiology,* 98(5), 1093–1100. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02553.x.

Huang, D., Xu, Y., Lei, F., Yu, X., Ouyang, Z., Chen, Y., Jia, H. & Guo, X. (2021). Degradation of polyethylene plastic in soil and effects on microbial community composition. *Journal of Hazardous Materials,* 416(March). https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126173.

José, S. & Jordao, L. (2020). Exploring the Interaction between Microplastics , Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Biofilms in Freshwater Exploring the Interaction between Microplastics , Polycyclic. *Polycyclic Aromatic Compounds*, 1–12. https://doi.org/10.1080/10406638.2020.1830809.

Lee, H., Kim, J., Choi, A., Kim, G., Kim, S., Mezgebe, B., Sahle-Demessie, E., & Han, C. (2024). Establishing freshwater sediment sample pretreatment methods for monitoring microplastics and its challenges. *Chemical Engineering Journal,* 491(February), 152059. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152059.

Maddela, N. R., Reddy, K. V., & Ranjit, P. (2023). Micro and Nanoplastics in Soil. In Micro and Nanoplastics in Soil: Threats to Plant-Based Food. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21195-9.

Sarkhel, R., Sengupta, S., Das, P. & Bhowal, A. (2020). Comparative biodegradation study of polymer from plastic bottle waste using novel isolated bacteria and fungi from marine source. *Journal of Polymer Research,* 27(1). https://doi.org/10.1007/s10965-019-1973-4.

Shabbir, S., Faheem, M., Ali, N., Kerr, P. G., Wang, L., Kuppusamy, S. & Li, Y. (2020). Periphytic biofilm: An innovative approach for biodegradation of microplastics. *Science of the Total Environment,* 717, 137064. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137064.

Sun, X. L., Xiang, H., Xiong, H. Q., Fang, Y. C., & Wang, Y. (2023). Bioremediation of microplastics in freshwater environments: A systematic review of biofilm culture, degradation mechanisms, and analytical methods. *Science of the Total Environment,* 863(October 2022). https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160953.

Zaman, A., & Newman, P. (2021). Plastics: are they part of the zero-waste agenda or the toxic-waste agenda? *Sustainable Earth,* 4(1). https://doi.org/10.1186/s42055-021-00043-8.

ESTADO DE CALCIO, MAGNESIO, MICRONUTRIMENTOS Y HUMEDAD EN SUELO CON MAÍZ Y FRIJOL: MANEJO ORGÁNICO Y CONVENCIONAL

Marilyn Juárez Flores[1]; David Cristóbal Acevedo[1]; Jorge Víctor Prado Hernández[1]

[1] Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco Km 38.5, CP 56264, Texcoco, Edo. Méx., México.

Correo del autor de correspondencia: floreslyn343@gmail.com

RESUMEN

En la agricultura actual se promueven enfoques sustentables que mejoren la fertilidad del suelo sin comprometer la producción. Este estudio evaluó, bajo condiciones de temporal, el efecto de 20 años de manejo orgánico (reincorporación de residuos de cosecha) y manejo convencional (fertilización mineral con NPK) sobre cultivos de maíz y frijol (*Zea mays L.* y *Phaseolus vulgaris L.*, respectivamente). Se establecieron cuatro tratamientos: Maíz Orgánico (MO), Maíz Convencional (MC), Frijol Orgánico (FO) y Frijol Convencional (FC). Se analizaron las concentraciones de Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn y B en el suelo a profundidades de 0, 15, 30, 60, 90 y 120 cm; asimismo, la humedad del suelo a profundidades de 4, 12 y 20 cm. Además de la biomasa aérea y radical, la producción y la calidad del grano (maíz y frijol). Los resultados indican que el manejo orgánico aumentó significativamente las concentraciones de Ca, Mg y Zn en la capa arable, mientras que en el manejo convencional Fe, Cu, Mn y B. Ca y Mg incrementaron con la profundidad; el resto disminuyó. Los manejos evaluados no presentaron variaciones significativas desde el punto de vista estadístico, ni en el rendimiento ni en la calidad. La humedad fue ligeramente mayor en manejo orgánico. No hubo correlación directa entre suelo y planta en nutrientes. En conclusión, el manejo orgánico favorece la mejora de diversas características del suelo, sin comprometer la producción ni la calidad en comparación con métodos convencionales, posicionándolo como una opción rentable, sustentable y adecuada para la agricultura de temporal.

PALABRAS CLAVE: *Agricultura sustentable; análisis de nutrientes; fertilización mineral; temporal; profundidad de suelo*.

INTRODUCCIÓN

El manejo sustentable del suelo representa uno de los principales retos para la agricultura moderna, particularmente en sistemas de temporal, donde la disponibilidad de agua y la conservación del recurso suelo son factores esenciales para conservar la productividad y la fertilidad. En este contexto, si bien existen diversos enfoques hacia la sustentabilidad (como la agroecología, la agricultura regenerativa, la permacultura, la agroforestería, entre otros), en el presente trabajo se abordaron dos enfoques contrastantes: el manejo orgánico, que promueve la incorporación de residuos de cosecha como fuente de nutrientes (Dragicevic *et al.,* 2022; Haruna y Nkongolo, 2020), y el manejo

convencional, basado en la aplicación de fertilizantes minerales del tipo NPK (Bairagi *et al.,* 2023; Abunyewa *et al.,* 2022). Ambos sistemas han sido ampliamente utilizados en México, pero sus efectos diferenciados sobre el suelo, los cultivos y la eficiencia del uso de recursos aún son objeto de estudio. Investigaciones han demostrado que los sistemas agrícolas que integran prácticas conservacionistas (como labranza mínima, rotación de cultivos y uso de coberturas vegetales) pueden modificar la disponibilidad de nutrientes del suelo (Haruna y Nkongolo, 2020). Estas mejoras no solo benefician la producción mejorando la sostenibilidad, sino que también reducen la dependencia de insumos externos y favorecen la mitigación del cambio climático mediante la captura de carbono en el suelo (Gamage *et al.,* 2023). Aunque la fertilización convencional con NPK ha sido efectiva para elevar rendimientos a corto plazo, se ha señalado que su uso exclusivo puede limitar la disponibilidad de micronutrientes críticos para el desarrollo vegetal, como Zn, Fe y B, afectando la calidad nutricional de los cultivos (Bairagi *et al.,* 2023; Abunyewa *et al.,* 2022).

Con el propósito de contribuir al conocimiento sobre el efecto de estos manejos en condiciones de temporal, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el estado del calcio (Ca), magnesio (Mg) y los micronutrientes hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn) y boro (B), así como el comportamiento de la humedad del suelo en el tiempo en cultivos de maíz (*Zea mays L.*) y frijol (*Phaseolus vulgaris L.)* después de 20 años de manejo orgánico y convencional. Asimismo, se buscó establecer la relación entre estas variables del suelo y la producción, calidad y biomasa de los cultivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en 2021, en el Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, en Texcoco, Estado de México (19°29’05’’ N, 98°53’11’’ O; altitud 2250 msnm). El tipo de suelo en ambos lotes se clasificó como textura franco-arenosa, con una composición aproximada de 13% arcilla, 23% limo y 64% arena. Estos terrenos han sido sometidos durante dos décadas a manejos contrastantes: uno de tipo orgánico (reincorporación de residuos de cosecha, sin fertilización adicional) y otro convencional (fertilización mineral NPK 200-100-80, aplicada mediante urea (46% N), cloruro de potasio (46% K) y superfosfato triple (46% P) 18-46-00 como fuente de fósforo).

Se establecieron cultivos de maíz (*Zea mays L.*) y frijol (*Phaseolus vulgaris L.),* conformando cuatro tratamientos: Maíz Orgánico (MO), Maíz Convencional (MC), Frijol Orgánico (FO) y Frijol Convencional (FC). Se empleó un diseño experimental completamente al azar, con tres repeticiones por tratamiento. La investigación fue de tipo cuantitativo y enfoque experimental, con evaluación en condiciones de campo. Se establecieron subparcelas para cada cultivo y, dentro de ellas, tres microparcelas aleatorias para el monitoreo de variables.

El muestreo de suelo se realizó a profundidades de 0, 15, 30, 60, 90 y 120 cm para determinar las concentraciones de Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn y B, siguiendo los métodos establecidos por la NOM-021-SEMARNAT-2000, utilizando el método de extracción con DTPA para Fe, Cu, Zn, Mn y B, y el método de EDTA para Ca y Mg, conforme a lo indicado en los numerales correspondientes de la norma. La humedad del suelo se midió

a 4, 12 y 20 cm con sondas TDR. Para efectos de referencia, los valores de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) se estimaron en 19.5% y 9.5% respectivamente, a partir de un muestreo de 12 unidades a nivel superficial, 15 y 30 cm.

Se registraron variables agronómicas como biomasa aérea y radical, producción de grano, número, diámetro y longitud de mazorca. Mediante un muestreo aleatorio representativo dentro de cada microparcela, se considera la variabilidad del cultivo y se asegura la repetibilidad de los datos. Los datos se analizaron mediante ANOVA y prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), y se aplicaron análisis de correlación para explorar relaciones entre nutrientes del suelo y variables productivas, utilizando el software SAS v.9.4.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de nutrientes en el suelo. En la capa arable del suelo (0–30 cm), MO y FO presentaron mayores concentraciones de Ca (1449.7 y 1392.0 mg kg-1), Mg (444.33 y 444.67 mg kg^{-1}) y Zn (2.7467 y 2.3333 mg kg^{-1}), mientras que MC y FC mostraron valores más altos de Fe (25.480 y 19.013 mg kg^{-1}), Cu (1.6500 y 1.8600 mg kg^{-1}) y Mn (12.753 y 12.267 mg kg^{-1}). Estas diferencias fueron estadísticamente significativas según el análisis de varianza y la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$). Resultados similares fueron reportados por Dragicevic *et al.* (2022), quienes señalaron una mayor acumulación de Ca y Mg bajo manejo orgánico prolongado, mientras que Bairagi *et al.* (2023) asociaron el incremento de Fe y Mn con aplicaciones repetidas de fertilizantes minerales.

Distribución en el perfil del suelo. MO y FO mostraron un comportamiento ascendente del Ca y Mg en relación con la profundidad. En MO, el Ca pasó de 1100 en superficie a cerca de 2,100 mg kg^{-1} a 120 cm, y el Mg de 400 a más de 500 mg kg^{-1}. En FO, el Ca aumentó de 1,200 a 2950 mg kg^{-1}, y el Mg de 350 a 640 mg kg^{-1} en el mismo intervalo. Este patrón sugiere una movilidad vertical de ambos nutrientes, asociada al efecto acumulativo de la reincorporación de residuos de cosecha. El mismo comportamiento se observó en MC y FC ya que el primero, en Ca pasó de 850 en superficie a cerca de 1150 mg kg^{-1} a 120 cm, y el Mg de 260 a poco más de 370 mg kg^{-1}, mientras que el segundo el Ca aumentó de aproximadamente 1100 a 2200 mg kg^{-1}, y el Mg de 310 a 525 mg kg^{-1} en el mismo intervalo, patrón que sugiere una movilidad vertical de ambos nutrientes.

En MO y FO, las concentraciones de Fe (10 y 12 mg kg^{-1}), Cu (1.2 y 1.1 mg kg^{-1}) y Mn (7 y 10 mg kg^{-1}) fueron mayores en las capas superficiales y disminuyeron con la profundidad (7 y 7.5 mg kg^{-1}; 0.9 y 0.8 mg kg^{-1}; 3 y 1.5 mg kg^{-1}; correspondientemente); en contraste, en MC y FC se observó una distribución más uniforme o poco creciente en relación con la profundidad, lo cual puede estar relacionado con procesos de lixiviación o baja absorción radical por profundidad (Abunyewa *et al.*, 2022; Farfán y Angoma, 2021).

Relación suelo-planta. En tejido vegetal, de acuerdo con el ANOVA hubo efecto ($Pr > F$), ya que al aplicar la prueba de Tukey ($\alpha > 0.05$) sobre las concentraciones de los elementos Ca (0.0318), Mg (0.0058) y Zn (0.0459) en planta después de 20 años de manejo orgánico y convencional en los cultivos de maíz y frijol. Se encontró que el valor medio del magnesio fue diferente en al menos uno de los tratamientos (en FC y FO los valores obtenidos fueron: 2000 y 2133 mg kg^{-1}, correspondientemente). Sin embargo, no se encontró una correlación directa entre las concentraciones del suelo y la planta. Esta falta

de relación ha sido descrita por Abunyewa *et al.* (2022) y Haruna y Nkongolo (2020), quienes señalan que los cultivos regulan la absorción según sus necesidades fisiológicas, y que las interacciones entre nutrientes pueden limitar o favorecer su acumulación en los tejidos.

Rendimiento, calidad y biomasa. No se evidenciaron cambios en el rendimiento y la calidad de los cultivos entre los distintos tratamientos. Las variables producción de grano (en maíz y frijol), biomasa aérea y radicular, número de mazorcas de primera y moloncos (mazorcas pequeñas y/o mal desarrolladas), diámetro y longitud de mazorca, no mostraron diferencias significativas entre los dos esquemas de manejo evaluados. Estos resultados coinciden con los de Montgomery y Biklé (2021), quienes concluyeron que sistemas orgánicos bien manejados pueden mantener rendimientos comparables a los convencionales sin comprometer la calidad ni la producción. Flores-Gallardo *et al.* (2024) señalan que, en sistemas de temporal con maíz y frijol, la productividad depende principalmente de la disponibilidad de agua y la estructura del suelo, siendo menos determinante la procedencia de la fertilización aplicada. Se identificaron relaciones directas entre Ca, Mg, Zn y B con variables como peso de hojas y tallos, número de mazorcas y moloncos, mientras que Fe, Cu y Mn mostraron relaciones inversas con biomasa, pero positivas con características de la mazorca. Estos patrones sugieren interacciones complejas entre nutrientes, donde concentraciones elevadas de ciertos elementos pueden generar antagonismos y desequilibrios que afectan el crecimiento y rendimiento de los cultivos (Bairagi *et al.,* 2023).

Contenido de humedad en el suelo. Respecto a la humedad del suelo, los tratamientos orgánicos (MO y FO) mostraron mayores niveles en las tres profundidades evaluadas (4, 12 y 20 cm), lo cual se atribuye al efecto estabilizador de la materia orgánica sobre la estructura y porosidad del suelo (Haruna y Nkongolo, 2020; Gamage *et al.,* 2023). Este resultado es particularmente relevante en sistemas de temporal, donde la disponibilidad hídrica es limitada e intermitente, afectando directamente la eficiencia del uso de nutrientes y el desarrollo de los cultivos (CONAGUA, 2022; SIAP, 2022). En conjunto, los resultados de la presente investigación confirman que el manejo orgánico mejora significativamente las propiedades químicas y físicas del suelo, favorece la distribución nutrimental en el perfil, mejora la retención de humedad y mantiene niveles productivos comparables al manejo convencional. Demuestra que un sistema basado en prácticas sostenidas agroecológicamente durante dos décadas puede sostener la fertilidad del suelo y reducir la dependencia de insumos sintéticos, contribuyendo así a la resiliencia agroproductiva, la sustentabilidad y la gobernanza de los recursos naturales en sistemas de temporal (Merrigan *et al.,* 2022; Farfán y Angoma, 2021; Montgomery y Biklé, 2021).

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación confirman que el manejo orgánico, entendido de manera matizada (pues se reconoce el papel de los insumos químicos en sistemas intensivos), constituye una alternativa técnica para mantener la productividad agrícola en sistemas de temporal, favoreciendo la fertilidad y la humedad del suelo sin comprometer el rendimiento ni la calidad de los cultivos. Aunque ambos manejos

mostraron rendimientos estadísticamente similares, presentaron diferencias en la dinámica y movilidad de nutrientes. Esto permite establecer que la absorción vegetal no depende solo de su concentración en el suelo, sino también de procesos fisiológicos y condiciones ambientales. La evaluación del perfil del suelo hasta 120 cm, junto con la humedad como variable sensible, permite una comprensión más integral del sistema suelo-planta-agua, clave para la toma de decisiones y la anticipación de procesos como lixiviación y/o acumulación de nutrientes, orientando un manejo sustentable del suelo.

En conjunto, esta investigación proporciona evidencia científica, sólida y pertinente para fortalecer políticas públicas orientadas a la sostenibilidad agrícola, la conservación de suelos y la resiliencia climática en regiones de temporal. Asimismo, visibiliza al manejo orgánico como una estrategia técnicamente fundamentada y socialmente replicable, capaz de reducir la dependencia de insumos sintéticos sin sacrificar productividad, y con potencial para contribuir a la mejora de productores pequeños y medianos que dependen de este sistema productivo.

BIBLIOGRAFÍA

Abunyewa, A. A., Amoakwah, E., Yeboah, S., Agyemang, I. & Antwi-Boasiako, J. (2022). Micronutrient management for increased soybean productivity in Ghana. *Frontiers in Sustainable Food Systems,* 6:796878. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.796878.

Bairagi, S. K., Hossain, M. M., Saha, U. K. & Hossain, M. S. 2023. Nutritional quality and productivity of eggplant are improved by balanced fertilization beyond NPK. *Agronomy*, 13(2):566. https://doi.org/10.3390/agronomy13020566.

Comisión Nacional del Agua, CONAGUA. (2022). Estadísticas agrícolas de los distritos de temporal tecnificado: año agrícola 2020–2021. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EADTT-2020-2021.pdf.

Dragicevic, V., Stoiljkovic, M., Brankov, M., Tolimir, M., Tabaković, M., Dodevska, M. S. & Simić, M. (2022). Status of essential elements in soil and grain of organically produced maize, spelt, and soybean. *Agriculture,* 12(5):702. https://doi.org/10.3390/agriculture12050702.

Farfán, H. & Angoma, A. P. (2021). Efecto de la fertilización orgánica mineral sobre la producción de maíz morado (Zea mays L.). *Revista de Investigación Científica Siglo XXI,* 1(1):97–106. https://doi.org/10.54943/rcsxxi.v1i1.14

Flores-Gallardo, H., Flores Magdaleno, H., Rubiños Panta, J. E., Prado Hernández, J. V., Meraz Maldonado, N. & Ascencio Hernández, R. (2024). Simulación del crecimiento y rendimiento de frijol cultivado bajo temporal con el modelo AquaCrop. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 47(4):359–368. https://doi.org/10.35196/rfm.2024.4.359.

Gamage, A., Gangahagedara, R., Gamage, J., Jayasinghe, N., Kodikara, N., Suraweera, P., y Merah, O. 2023. Role of organic farming for achieving sustainability in agriculture. *Farming System,* 1(1):100005. https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100005

Haruna, S. I., y Nkongolo, N. V. 2020. Influence of cover crop, tillage, and crop rotation management on soil nutrients. Agriculture, 10(6):225. https://doi.org/10.3390/agriculture10060225

Merrigan, K., Giraud, E. G., El Hage Scialabba, N., Brook, L., Johnson, A. & Aird, S. (2022). Grow Organic: The climate, health and economic case for expanding organic agriculture. Natural Resources Defense Council. https://www.nrdc.org/resources/grow-organic-climate-health-and-economic-case-expanding-organic-agriculture.

Montgomery, D. R. & Biklé, A. (2021). Soil health and nutrient density: Beyond organic vs. conventional farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5:699147. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.699147

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP. (2022). Panorama agroalimentario 2022. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. https://www.gob.mx/siap/prensa/panorama-agroalimentario-2022?idiom=es.

ESTIMAR LA DOSIS EFECTIVA DE BIOCARBÓN SUPLEMENTADO CON *Serratia* spp. EN EL CONTROL DE HONGOS ASOCIADOS A TRIGO (*Triticum aestivum* L.)

Jesús Centeno Melgarejo[1]; Moisés Graciano Carcaño Montiel[1]; Leticia Gómez Velázquez[1,2]; Guadalupe Medina de la Rosa[1,3]; Armando Tapia Hernández[1]; Lucía López Reyes[1,2]

[1] Microbiología de Suelos, [2] Posgrado en Ciencias Ambientales, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, Pue., México.
[3] Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, México.

Correo del autor de correspondencia: lucia.lopez@correo.buap.mx

RESUMEN

El trigo es el tercer cultivo más importante a nivel mundial, porque participa en la alimentación humana y ganadera. Pero su productividad se ve amenazada por hongos patógenos que provocan pérdidas de las cosechas y baja calidad del grano; su manejo incluye productos químicos que son poco eficientes. Otras alternativas son el biocontrol con Bacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal (BPCV) como *Serratia* spp. y biocarbón. Las BPCV tienen mecanismos que limitan el desarrollo de enfermedades y el biocarbón contribuye a la salud de las plantas porque mejora la estructura, fertilidad y microbiota del suelo, su acción depende del origen, dosis y sitio de aplicación. El objetivo de esta investigación fue estimar la dosis efectiva de biocarbón suplementado con *Serratia* spp. para el control de hongos asociados al trigo. Se aplicó biocarbón al 0.5%, 1.5%, 2.0%, 3.0%, 4.0% y 4.5% con y sin *Serratia* sobre semillas en condiciones *in vitro* y se evaluó la presencia de colonias fúngicas. Se realizó un experimento de campo con aplicación de biocarbón sobre semilla y suelo (3.0% y 1.5%), con y sin BPCV. Se comparó con el fungicida ciproconazol como testigo. Finalmente, se evaluaron las características vegetativas del trigo, el daño foliar provocado por hongos y la actividad de la deshidrogenasa del suelo. Las dosis ≤1.5% con *Serratia*, aumentaron la sanidad de semillas. Todos los tratamientos redujeron el daño foliar e incrementaron la actividad nitrogénica, pero biocarbón 3%, *Serratia* y biocarbón 1.5% fueron más eficientes. Por lo tanto, estos insumos se pueden considerar una estrategia en la agricultura sostenible.

PALABRAS CLAVE: *Control biológico; daño foliar; dosis; fitopatógenos; fungicida.*

INTRODUCCIÓN

El trigo es uno de los tres cereales más cultivados en el mundo con más de 700 millones de toneladas cosechadas anualmente. Es fuente de energía para la alimentación humana y, debido a su alto contenido de almidón, sirve para la elaboración de pan, pastas y otros productos alimenticios (Golik, 2022). Este cultivo se encuentra entre los dos cereales más consumidos en México (SADER, 2022). Sin embargo, su producción se ve afectada por el encarecimiento de insumos agrícolas, el cambio climático, la contaminación del suelo, la pérdida de biodiversidad y la presencia de plagas y enfermedades (Márquez *et al.*, 2021).

En el mundo se han reconocido 31 patógenos del trigo, pero los más dañinos son los hongos (Simón y Fleitas, 2022), porque son difíciles de controlar y erradicar con métodos convencionales como el uso de agroquímicos, semillas mejoradas y manejo cultural (Taj *et al*., 2022). Por lo tanto, es necesario buscar estrategias ecológicas y sustentables que disminuyan sus efectos, entre las que se encuentran el uso de Bacterias Promotoras del Crecimiento Vegetal (BPCV) y de biocarbón como enmienda de suelos.

Las BPCV favorecen el crecimiento y la sanidad de las plantas a través de la producción de fitohormonas, compuestos orgánicos volátiles, sideróforos y fijación de nitrógeno, competencia por nutrientes y la inducción de la resistencia sistémica de la planta (Khoso *et al*., 2023). Mientras que el biocarbón se ha estudiado recientemente, por su capacidad enmendadora de suelos, liberación lenta de nutrientes, minerales y agua, funciona como nicho para microorganismos, modifica el perfil de exudados radiculares y estimula la respuesta inmune de la planta (Alaylar *et al*., 2021), también puede cambiar la motilidad y colonización de microorganismos y liberar compuestos que lo convierten en una estrategia prometedora dentro del manejo integrado de patógenos y plagas (Poveda *et al*., 2021). Sin embargo, su acción depende del origen de la materia prima para su fabricación, las propiedades del suelo y las dosis de aplicación. Actualmente se estudia el efecto combinado de las BPCV y el biocarbón, para potenciar y dirigir su efecto contra microorganismos patógenos de plantas. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue estimar la dosis efectiva de biocarbón suplementado con BPCV en el control de hongos asociados a trigo (*Triticum aestivum* L.).

MATERIALES Y MÉTODOS

La técnica de sanidad de semillas en papel secante descrita por Warham (1997), fue modificada y adaptada para evaluar el porcentaje de biocarbón estudiado en la prueba *in vitro*. Se utilizaron semillas de trigo de la var. Valles F2015, resistente a royas, tizones y manchas foliares (Villaseñor *et al*., 2018) y bacterias del cepario del Laboratorio de Microbiología de Suelos de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla: *Serratia grimesii* (BUAP-P5S) y *Serratia proteamaculans* (BUAP-P1R y BUAP-P3S), se propagaron en caldo de soya y tripticaseina a 32 ± 2 °C durante 24 h a 220 rpm. Los tratamientos aplicados fueron: 1) *Serratia*, 2) biocarbón 1.5%, 3) biocarbón 1.5%+*Serratia*, 4) biocarbón 2.0%, 5) biocarbón 2.0%+*Serratia*, 6) biocarbón 3.0%, 7) biocarbón 3.0%+*Serratia*, 8) biocarbón 4.0%, 9) biocarbón 4.0%+*Serratia*, 10) biocarbón 4.5%, 11) biocarbón 4.5%+*Serratia*, 12) ciproconazol (400 mL/ha), y 13) se aplicó agua como testigo. La técnica se realizó en papel filtro estéril humedecido, donde se colocaron 100 semillas de trigo previamente desinfectadas con hipoclorito de sodio al 10% (AlEn®) y tratadas. Se enrollaron e incubaron a temperatura ambiente por 10 días. Posteriormente, se evaluó: el porcentaje de germinación y colonias fúngicas sobre la semilla, determinadas por su apariencia morfológica. El ensayo se realizó por triplicado. El experimento de campo se realizó de agosto a noviembre de 2024, en el Municipio de San José Teacalco, Tlaxcala, con coordenadas 19°20´ latitud norte y 98° 04´ latitud oeste, en una superficie de 28 x 7 m dividida en parcelas de 2 x 2 m, con un diseño completamente al azar. Se aplicaron nueve tratamientos con tres repeticiones: 1) biocarbón en semilla, 2) biocarbón en

semilla+*Serratia*, 3) biocarbón al 1.5%, 4) biocarbón al 1.5%+*Serratia*, 5) biocarbón al 3.0%, 6) biocarbón al 3.0%+*Serratia*, 7) *Serratia*, 8) ciproconazol y 9) testigo sin inocular. Para cada repetición se sembraron 80 g de semilla de trigo de la var. Valles F2015. Los tratamientos con *Serratia* spp., se inocularon con 50 mL de cultivo bacteriano (10^8 UFC.mL^{-1}). El porcentaje de biocarbón aplicado al suelo se calculó considerando una profundidad de 0.3 m, mientras que los tratamientos uno y dos, se prepararon mezclando el biocarbón (40 g) y las semillas, antes de la siembra. Se utilizo un adherente comercial alcohol polivinílico y poliglicoléter etoxilado (PROLUX®). Después de 18 semanas se midieron: altura, diámetro del tallo, masa seca, longitud de la espiga y número de granos. Asimismo, se calculó el área de daño foliar provocado por hongos con el software Image J y se determinó la actividad deshidrogenasa como indicador de la actividad microbiana en el suelo (Casida *et al.* 1964). Los datos se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias (Tukey), con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$, con el software R versión 2023.12.1+402.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron cuatro tipos de colonias fúngicas sobre los granos de trigo: amarillo (A), blanco (B), negro (C) y rosa (D), que de acuerdo con Gómez-Velázquez (2024), son provocadas por más de una especie fúngica. La colonia del tipo A) *Fusarium equiseti* y *Geotrichum Candidum*, B) *Alternaria arborescens, Epicoccum sorghinum* y *F.* sp., C) *Alternaria alternata, A. arborescens, Chaetonium mareoticum y Epicoccum* sp. y D: *F. sp.* y *F. tricinctum.*

Cuadro 1. Efecto de diferentes dosis de biocarbón y BPCV sobre la presencia de colonias fúngicas en semillas de trigo de la var. Valles F2015.

Tratamiento	Semillas sanas	Colonias fúngicas			
		Negro	Rosa	Amarillo	Blanco
			%		
Biocarbón 1.5%	71.5 ± 1.5 bd	8.5 ± 1.5 a	2.0 ± 1.0 b	2.0 ± 1.0 b	16.0 ± 2.0 ac
Serratia + Biocarbón 1.5%	93.5 ± 1.5 c	2.0 ± 0.0 c	0.5 ± 0.5 a	0.0 ± 0.0 b	4.0 ± 1.0 b
Biocarbón 2%	85.5 ± 0.5 c	3.5 ± 0.5 c	0.0 ± 0.0 a	0.0 ± 0.0 b	11.0 ± 1.0 ab
Serratia + Biocarbón 2%	70.5 ± 4.5 bd	18.0 ± 1.0 d	0.5 ± 0.5 a	0.0 ± 0.0 b	11.0 ± 5.0 ab
Biocarbón 3%	16.0 ± 1.5 e	44.3 ± 3.0 bc	12.0 ± 2.0 b	3.7 ± 0.5 a	23.7 ± 1.6 a
Serratia + Biocarbón 3%	29.5 ± 1.8 ed	23.0 ± 3.5 ac	5.5 ± 2.0 b	0.5 ± 0.4 ab	41.5 ± 3.9 ab
Biocarbón 4%	16.0 ± 3.0 e	0.0 ± 0.0 c	0.0 ± 0.0 a	0.0 ± 0.0 b	82.0 ± 3.0 d
Serratia + Biocarbón 4%	75.5 ± 2.5 d	13.0 ± 0 ab	0.0 ± 0.0 a	0.0 ± 0.0 b	10.0 ± 4.0 bc
Biocarbón 4.5%	67 ± 1.4 ad	14.5 ± 2.5 bd	0.5 ± 0.5 a	6.0 ± 2.0 a	12.0 ± 1.0 ab
Serratia + Biocarbón 4.5%	60.5 ± 2.5 a	11.0 ± 4.0 ab	0.0 ± 0.0 a	13.5 ± 1.5 c	15.0 ± 3.0 ac
Serratia	62.5 ± 0.5 ab	11.5 ± 1.5 ab	0.0 ± 0.0 a	6.0 ± 3.0 a	20.0 ± 5.0 a
Ciproconazol	90.5 ± 5.5 c	2.5 ± 0.5 c	0.0 ± 0.0 a	3.0 ± 1.0 ab	4.0 ± 4.0 b
Testigo	49.5 ± 5.5 f	31.5 ± 1.5 e	0.0 ± 0.0 a	0.0 ± 0.0 b	19.0 ± 4.0 ac

Los valores son la media de 3 repeticiones ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas $p \leq 0.05$. [a] (400 mL/ha).

Todos los tratamientos con *Serratia* y biocarbón (excepto biocarbón al 4%, 3% y biocarbón 3%+*Serratia*), incrementaron el número de semillas sanas, de 60.5 hasta 93% de

semillas sanas, comparados con el testigo (49.5%) como se observa en el Cuadro 1. Alaylar *et al.* (2021) reportan que la aplicación del biocarbón en dosis menores al 1% es más eficiente en el control de hongos que las superiores al 3%. Además, en general se observa que la adición de *Serratia* potencia el efecto del biocarbón en el control de hongos. Zhang *et al.* (2021), atribuyen al biocarbón la capacidad de incrementar la actividad bacteriana debido a que mejora su entorno biológico, por lo cual, favorece las condiciones que le permiten persistir en el ambiente y beneficiar el desarrollo de las plantas. Las colonias fúngicas en semillas más abundantes fueron C y B, donde predominan *Alternaria, Chaetonium, Epicoccum* y *Fusarium*. Investigadores han reportado estas especies como patógenas de trigo en todos sus estadios; además, producen micotoxinas (deoxinivalenol) persistentes en los granos que afectan a la salud de los consumidores (Spanic *et al.*, 2021).

Cuadro 2. Evaluación del daño foliar y actividad nitrogenasa del suelo, en el cultivo de trigo en San José Teacalco, Tlaxcala.

Tratamiento	Daño Foliar	TPF total (µg/mL)
Biocarbón 3%	8.8 ± 4.9 a	24.3 ± 3.2 a
Biocarbón 3%+*Serratia*.	8.1 ± 6.3 a	6.7 ± 0.5 c
Biocarbón 1.5%	2.7 ± 0.2 a	17.8 ± 0.0 b
Biocarbón 1.5%+*Serratia*	8.0 ± 3.7 a	6.5 ± 2.07 c
Biocarbón+semilla+*Serratia*	6.2 ± 2.3 a	8.8 ± 0.9 c
Biocarbón semilla	5.5 ± 0.8 a	8.5 ± 1 c
Serratia	7.9 ± 1.4 a	23.4 ± 3.9 a
Fungicida	5.8 ± 1.1 a	7.6 ± 1.1 c
Testigo	10.0 ± 3.5 a	6.0 ± 0.1 c

Los valores son la media de 3 repeticiones ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma columna representan diferencias significativas $p \leq 0.05$. [a] (400 mL/ha).

En el ensayo de campo no se detectaron diferencias significativas en la evaluación de las características vegetativas, pero se observó que el daño foliar provocado por hongos disminuyó cuando se aplicó biocarbón al 1.5% en el suelo y en semilla, con y sin *Serratia* (Cuadro 2). La actividad deshidrogenasa aumentó con biocarbón al 3%, *Serratia* spp. y biocarbón al 1.5%. Este fenómeno es multifactorial porque el biocarbón actúa como enmendador del suelo, por su naturaleza carbonosa y alta porosidad, favorece su estructura física e incrementa la retención de agua y nutrientes, además, estimula la actividad microbiana benéfica, limitando el desarrollo de patógenos (Bonanomi *et al.*, 2017). Los poros del biocarbón sirven de microhábitat para el establecimiento, protección y propagación de microorganismos benéficos; por lo tanto, favorecen su competencia y antagonismo frente a patógenos fúngicos (Zhang *et al.*, 2021).

Las BPCV también actúan en favor del control de enfermedades a través de la activación de la resistencia sistémica en la planta, por rutas de señalización que permiten la respuesta oportuna del hospedero (Lugtenberg y Kamilova, 2009). Los hallazgos de esta investigación coinciden con los encontrados por otros autores tanto en trigo como en otros cultivos, donde se observó el efecto positivo en la supresión de enfermedades foliares y el incremento de la tolerancia al estrés biótico, con dosis inferiores al 1.5% de biocarbón y BPCV (Egamberdieva *et al.*, 2018). Por lo tanto, el uso de estos insumos se

puede considerar una estrategia en la agricultura sostenible porque reduce la presencia de hongos en las semillas y los daños foliares.

CONCLUSIONES

Las dosis de biocarbón menores de 1.5% en suelo son efectivas en el control biológico de hongos asociados a semillas de trigo, mezcladas con *Serratia grimesii* (BUAP-P5S) y *Serratia proteamaculans* (BUAP-P1R y BUAP-P3S). Mientras que, el biocarbón al 3% y las BPCV y biocarbón al 1.5% son capaces de disminuir el daño foliar en el cultivo y aumentar la actividad microbiana del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto de investigación "Control biológico de enfermedades fúngicas del trigo (*Triticum aestivum* L.) con BPCV y biocarbón" que ha sido financiado por VIEP-BUAP-2025-100155588, con recursos para el fortalecimiento del BUAP-CA-99 por parte del Instituto de Ciencias (ICUAP) y al Programa Institucional BiofertiBUAP.

BIBLIOGRAFÍA

Alaylar, B., Gulluce, M., Egamberdieva, D., Wirth, S. & Bellingrath-Kimura, S. D. (2021). Biochar mediated control of soil-borne phytopathogens. *Environmental Sustainability,* 4(2), 329–334.

Bonanomi, G., Ippolito, F., Cesarano, G., Nanni, B., Lombardi, N., Rita, A., Saracino, A. & Scala, F. (2017). Biochar as plant growth promoter: Better off alone or mixed with organic amendments? *Frontiers in Plant Science*, 8.

Casida, L.E., Klein. D.A., Jr, Santoro, T. (1964). Soil dehydrogenase activity. Soil Sci. 98: 371-376.

Egamberdieva, D., Hua, M., Reckling, M., Wirth, S. & Bellingrath-Kimura, S. D. (2018). Potential effects of biochar-based microbial inoculants in agriculture. *Environmental Sustainability*, 1(1), 19–24.

Golik, S.I. (2022). Trigo: origen, sistemática, importancia. En Simón, M.R. & Golik S.I.

Gómez-Velázquez, L. (2024). Control biológico de enfermedades fúngicas del trigo (Triticum aestivum L.) con bacterias BPCV y biocarbón. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. https://hdl.handle.net/20.500.12371/25036.

Khoso, M. A., Wagan, S., Alam, I., Hussain, A., Ali, Q., Saha, S., Poudel, T.R., Manghwar H. & Liu, F. (2023). Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (BPCV) on plant nutrition and root characteristics: Current perspective. *Plant Stress*, 100341.

Lugtenberg, B. & Kamilova, F. (2009). Plant-growth-promoting rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology,* 63, 541–556.

Márquez, D. L., Hernández, A., Márquez, L. H. & Casas, M. (2021). La educación ambiental: evolución conceptual y metodológica hacia los objetivos del desarrollo sostenible. *Universidad y Sociedad,* 13(2), 301-310.

Poveda, J., Martínez-Gómez, Á., Fenoll, C. & Escobar, C. (2021). The Use of Biochar for Plant Pathogen Control. *Phytopathology,* 111(9), 1490–1499.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, SADER. (2022). Cultivo de trigo en México: todo lo que debes de saber.

Simón, M.R. & Fleitas M.C. (2022). Trigo: manejo de enfermedades. Universidad Nacional de la Plata.

Spanic, V., Cosic, J. & Drezner, G. (2021). Characterization of agronomical and quality traits of winter wheat (Triticum aestivum L.) for Fusarium head blight pressure in different environments. *Agronomy,* 11(2), 213.

Taj, M., Sajjad, M., Li, M., Yasmeen, A., Mubarik, M. S., Kaniganti, S. & He, C. (2022). Potential targets for CRISPR/Cas knockdowns to enhance genetic resistance against some diseases in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Frontiers in Genetics,* 13.

Villaseñor, H., Huerta, J., Hortelano, R., Martínez, E., Espitia, E., Solos, E., Osorio, L. & Rodríguez, M. F. (2018). Valles F2015: nueva variedad de trigo para siembras de temporal en México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas,* 9(6), 1315-1320.

Warham, E. J., Butler, L. D. & Sutton, R. C. (1997). Ensayos para la semilla de maíz y de trigo Manual de laboratorio.

Zhang, Y., Wang, J. & Feng, Y. (2021). The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: A review. *Catena,* 202, 105284.

FERTILIDAD Y CALIDAD DE SUELOS EN FILOMENO MATA, TOTONACAPAN, VERACRUZ, MÉXICO

Rogelio Álvarez Hernández[1]; Miriam Galán Reséndiz[2]

[1]Centro de Investigación en Agricultura Orgánica (CIAO), Universidad Autónoma Chapingo.
[2]Área de Pedometría y Sensores Remotos, DEIS en Suelos, Universidad Autónoma Chapingo.

Correo del autor de correspondencia: mgalanr@chapingo.mx

RESUMEN

En este trabajo, los suelos evaluados en los cafetales del Totonacapan, Veracruz, México, fueron calcáreos, abruptos, arcillosos, adhesivos y de difícil laboreo, así como con baja infiltración y permeabilidad. Además, presentaron drenaje deficiente y tuvieron un pH de la solución ligeramente ácido, una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) y un alto porcentaje de saturación de bases (PSB). Asimismo, se observó que en los suelos de los cafetales hubo déficit de nitrógeno y potasio, déficit de fósforo (P) y boro (B) y exceso de calcio (Ca), pues son elementos antagónicos; asimismo, fue abundante el hierro (Fe). Hubo lenta descomposición de materia orgánica (MO) y desbalance nutricional. El análisis foliar indicó un déficit en N y Ca y contenidos variables de los otros nutrimentos. Las principales relaciones de variables fueron Mg-Zn, Cu-MO, CIC-Ca, pH-N, Na-CE, Mn-B y Ca versus B-P. Los factores positivos de calidad del suelo fueron estructura y profundidad, y los negativos fueron erosión y estado de residuos. Cabe resaltar que el uso de insumos químicos fue poco. Se optó por residuos de plantas y abonos orgánicos, enriquecidos con solución nutritiva. Se requieren prácticas agroecológicas necesarias y adicionales. Se deben promover los saberes tradicionales.

PALABRAS CLAVE: *Análisis foliar del café; experiencia campesina; limitantes edáficas; manejo de cafetales; relaciones catiónicas.*

INTRODUCCIÓN

Según los suelos, el clima y el manejo del cultivo, es común el déficit y el desbalance de nutrimentos y se reconoce por los productores un alto efecto del cafeto a la fertilización, pero por causas económicas, poco se practica, prefiriéndose el manejo de residuos de cosecha o abonos orgánicos, y productos a base de Cu, preventivos de la roya. Tales materiales se pueden enriquecer con soluciones nutritivas o soluciones foliares. Algunas prácticas agroecológicas son: uso de microterrazas, siembra de árboles de sombra fijadores de N_2, siembra de leguminosas de cobertera entre líneas de cafeto, incorporación de restos de cosecha y de vegetación nativa y uso de abonos orgánicos, naturales o elaborados, y enriquecidos con bioles o soluciones nutritivas. Otras labores culturales accesorias como podas cíclicas, arreglo de sombra, deshijes, reemplazo de plantas improductivas, control de malezas, plagas y enfermedades (Noriega, 2007). Por ello, se concluye que es necesario que cada vez que se ejecuten estas labores de cultivo, se acompañen de prácticas de protección del suelo. Para que el cafetal opere como sistema agroforestal, debe tener un manejo adecuado, pues los árboles pueden promover

enfermedades y plagas, y ser hospederos de nuevas plagas y dificultar las labores de manejo del cafetal (Noriega, 2007).

Aunque los agricultores reconocen que el café responde bien a los fertilizantes, su uso se limita por causas económicas. Es más común el uso de abonos orgánicos como bocashi, composta, soluciones como caldo sulfocálcico y caldo bordelés, y productos a base de Cu para prevenir la roya. Estos materiales pueden enriquecerse con soluciones nutritivas (Villatoro, 2014). Existen prácticas agroecológicas que son esenciales para una producción sostenible. Son: microterrazas para controlar la erosión del suelo; árboles de sombra que fijen N_2 en el suelo, leguminosas de cobertura entre hileras de café para mejorar la fertilidad; incorporación de biomasa mediante restos de cosecha y de la vegetación nativa; abonos orgánicos naturales o elaborados, enriquecidos con soluciones nutritivas, para mejorar la salud edáfica (Villatoro, 2014). Otras labores culturales complementarias, incluyen: podas cíclicas y arreglo de sombra, deshijes (eliminación de brotes no deseados), reemplazo de plantas improductivas, control de malezas, plagas y enfermedades (Villatoro, 2014). Este mismo autor menciona que el manejo agroforestal es decisivo para mejorar prácticas de protección del suelo; es importante, pues un manejo inadecuado del dosel arbóreo promueve plagas y enfermedades, o dificulta las labores de manejo del cafetal. Por ello, un manejo agroforestal adecuado es básico para un buen funcionamiento como sistema productivo y sostenible.

En este sentido, los objetivos de este trabajo fueron caracterizar los factores edáficos y la fertilidad de los suelos del agroecosistema café y diseñar un plan de manejo de los suelos cafetaleros de la zona de estudios.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en Filomeno Mata, Veracruz, que cuenta con una superficie de 60.2 km²; entre 20°10'20'' N y 97°38'9'' O, y una altitud de 194 a 748 m, clima semicálido húmedo con lluvia todo el año, temperatura de 20 a 26°C y precipitación de 2,900 a 3,100 mm (INEGI, 2005). El muestreo de suelos se realizó en 4 áreas del municipio (SE, NO, NE y SO) a 3 altitudes (baja, intermedia y alta); las muestras se tomaron con base en SEMARNAT, 2002.

Se efectuaron en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos de Gisena, S. A. de C. V., Castellanos *et al*. 2002; SEMARNAT, 2002). Las propiedades físicas que se determinaron fueron: textura, Bouyoucos; densidad aparente (Dap), parafina (Castellanos *et al*. 2002) y espacio poroso. Las propiedades químicas fueron: pH, relación suelo-agua destilada (1:2); $N\text{-}NO_3$ (nitratos), extraído con KCL 2N y determinado por arrastre de vapor; fósforo aprovechable, método de Bray; potasio intercambiable, extraído en acetato de amonio (AA) 1.0N pH 7.0, relación 1:20 y determinado en un espectrofotómetro de emisión de flama; así como Ca^{+2} y Mg^{+2} intercambiables por extracción con AA, pH 7.0 relación 1:2 y se determinó con un espectrofotómetro de absorción atómica. También se determinaron Fe, Cu, Zn y Mn, extraídos con DTPA relación 1:4 y determinados por espectrofotometría de absorción atómica; boro, extraído con $CaCl_2$ 1.0M y fotocolorimetría de azometina-H; materia orgánica por el método de Walkley y Black; CIC, por el método del AA y se calculó el PSB. Las propiedades hidráulicas que se determinaron fueron: saturación de

humedad por el método de pasta saturada y extracción de agua bajo presión; capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP) con el método de la membrana permeable, y la humedad aprovechable restando al valor de CC y PMP. Para la conductividad hidráulica (Kh), se empleó el método del infiltrómetro de presión (SEMARNAT, 2002).

Para el análisis foliar se utilizaron entre 20 y 30 hojas, antes de la floración en el 2° par de hojas del tercio medio de la planta (Nelson, 1989).

La interpretación de los resultados se realizó según lo descrito por Castellanos *et al*. (2000), Etchevers (2000) y SEMARNAT (2002). Se crearon niveles de fertilidad, cálculo e interpretación de relaciones catiónicas (Bertsch, 1998; Sadeghian, 2012). Se realizó el análisis estadístico multivariado a través de Análisis de Componentes Principales con los valores de los suelos para conocer relaciones entre variables, con Statgraphics Centurión XVIII©. Se procedió a realizar la evaluación de calidad del suelo según Altieri y Nicholls (2002).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos tuvieron un pH ($\bar{x}$ = 5.78; moderadamente ácido), algunos fueron levemente > 4. Si el pH es > 5.5, disminuyen los problemas de toxicidad de Al que precipita como [$Al(OH)_3$] insoluble. Los suelos tuvieron altas cifras de CIC, importantes por su rol como almacén de K, Mg y Ca fácilmente disponibles, y protegidos contra la lixiviación (Sadeghian, 2012). Hubo relación entre la CIC y la acidez, pues al subir el pH del suelo se crean nuevas cargas negativas (-) en el complejo de cambio (Sadeghian, 2012). Se cree que gran parte de la CIC de los suelos de la región deriva del humus, aunque la arcilla exhibió alta influencia. Los valores de MO fueron de medio a alto ($\bar{x}$ = 4.57%); su lenta transformación, por el clima, indica que, en 75% de los suelos, el aporte de MO es deseable, en 12% conveniente y en 13% necesario; proviene de la hojarasca del cafeto y de árboles de sombra (Noriega *et al*., 2014).

Los NO_3^- ($\bar{x}$ = 16.15 ppm) fueron muy bajos con déficit de N en todos los predios y alta correlación con la baja tasa de transformación de MO, pues la acidez frena el desarrollo de bacterias y reduce la mineralización (Noriega *et al*., 2014). El P ($\bar{x}$ = 5.2 ppm) indicó baja disponibilidad para el cafeto (Sadeghian, 2012). Hay una influencia positiva moderada de la CIC y del Ca en el nivel del P en el suelo; tal vez el P reacciona con el Ca y forme fosfatos de calcio insolubles [fosfato monocálcico ($Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$) o fosfato dicálcico ($CaHPO_4$)], muy estables y no asimilables por las plantas (Sadeghian, 2012). El K^+($\bar{x}$ = 175 ppm) indicó niveles bajos, pero las cifras de las relaciones catiónicas mostraron que no se debe adicionar. Respecto al Ca, la mayoría de los predios tuvieron alto nivel, con > 10 Cmol (+)Kg^{-1} o meq/100 g de suelo, superior al nivel crítico de 1.6 Cmol (+)Kg^{-1}. El exceso de Ca es antagónico al K, Mg, Na, Zn, P y B. Ningún predio mostró deficiencia de Mg pues su valor en Cmol(+)Kg^{-1} fue mayor al nivel crítico; los predios se situaron en el rango ideal de 1-10 Cmol(+)Kg^{-1} con un nivel adecuado. El Na con ($\bar{x}$ = 19.62 ppm) indicó un valor muy bajo, causado por las altas lluvias, lo que es adecuado, pues el cafeto es muy sensible a la sal (Castellanos *et al*., 2002; Sadeghian, 2012).

Los suelos mostraron alto valor de PSB; dominando el Ca entre los 4 cationes básicos, por la geología de la zona. Las relaciones catiónicas son un criterio para interpretar análisis de suelos. En base a valores críticos de Bertsch (1998), 37.5% de los predios tuvieron desbalance positivo en la relación Ca/Mg, que marcó un exceso en el nivel de Ca y posible déficit de Mg y K; respecto a la relación Ca/K, 62.5% de los terrenos tuvieron alto nivel de Ca que podría inducir déficit de Mg y K (Bertsch (1998; Sadeghian, 2012). Solo el 3,125% de los predios mostraron un desbalance negativo en la relación Mg/K, que indica exceso de K y poco Mg. Respecto a la relación Ca + Mg/K, 37.5% de los suelos tuvieron desbalances negativos en donde el nivel de K fue mayor y el de Ca menor. Altas cifras de Ca inducen déficit de Mg y K en el café, si las relaciones Ca/Mg y Ca/K muestran un desbalance positivo (Bertsch, 1998; Sadeghian, 2012). El Fe con ($\bar{x}$ = 58.93 ppm), abundó en la región y generó interacciones negativas con P y Cu. El Cu ($\bar{x}$ = 1.11 ppm), el Zn ($\bar{x}$ = 1.68 ppm) y el Mn ($\bar{x}$ = 16.05 ppm) expresan niveles medios. El B ($\bar{x}$ = 0.13 ppm) tuvo muy bajo nivel, a causa de la abundancia de Ca, lo que induce la formación de borato de calcio [$Ca_3(BO_3)_2$] insoluble y no aprovechable por la planta; el B fue muy más escaso en la región; se vincula a la absorción de P, Mg^{2+} y Ca^{2+} (Bertsch, 1998). El 100% de los predios revelaron deficiencia de N y Ca foliar (Nelson, 1989; Castellanos *et al*., 2002). El 66.66% con cifras óptimas y 33.33% con déficit de P; 60% mostraron valores óptimos y 40% insuficientes de K. Para el Mg, 26% expresaron cifras ideales y 73% deficientes. Solo 33.33% tuvieron cifras adecuadas de Fe y 66.66% fueron deficitarias. Respecto al Cu y al Zn, solo un predio tuvo datos óptimos (6.66%) y en el 93.33% excesivos. El Mn foliar indicó cifras de 60% óptimas y 40% bajas. Para B, 86% de las muestras mostraron valores excesivos y solo el 13.33% fueron óptimos (Nelson, 1989; Castellanos *et al*., 2002).

La mayoría de los suelos fueron de textura fina, consistencia adhesiva, compactibilidad, alto encostramiento y labranza difícil por las pendientes; el laboreo en húmedo fue casi imposible. La infiltración varió de regular a deficiente, con una percolación de lenta a muy lenta y un drenaje deficiente. La retención de agua osciló de media a alta y conllevó una aireación pobre a pesar de la porosidad de 50.23%. Los suelos tuvieron un valor de PMP de 18.49%, CC de 33.26%, agua aprovechable de 14.77%, 16.97% de agua gravitacional; la saturación de humedad fue de 50.23% (Castellanos *et al*, 2002). La susceptibilidad a erosión eólica es baja y la erosión hídrica es lenta, aunque se potencia por las pendientes. La Dap promedia 1.32 $g \cdot cm^{-3}$, lo que indica que los suelos no están compactados (Altieri y Nicholls, 2002).

En la Figura 1 se observa el grado de asociación entre variables, según la separación angular y la distancia del vector al origen, en el cuadrante I. Las mejores asociaciones fueron Mg-Zn; hay una relación poco intensa entre estos nutrimentos y el Cu, por un lado, y la MO por otro lado, pues la lenta descomposición de la MO induce desbalances nutrimentales. En el cuadrante IV, la mejor relación fue CIC-Ca, debido a que el Ca tiene gran dependencia con la CIC; pH-NO_3; y Na-CE, esta se establece por una alta dependencia entre el Na y la CE y a su vez tienen un estrecho vínculo con la salinidad edáfica. La relación menos intensa en otro cuadrante fue Mn-B.

Respecto a la calidad de los suelos (Figura 2), se muestran las evaluaciones en 15 predios. Los factores de más impacto positivo fueron estructura y profundidad de los suelos y negativamente erosión y estado de residuos (Altieri y Nicholls, 2002). Los predios de más calidad fueron el 4 y el 15; los predios con menores índices fueron el 8 y el 13.

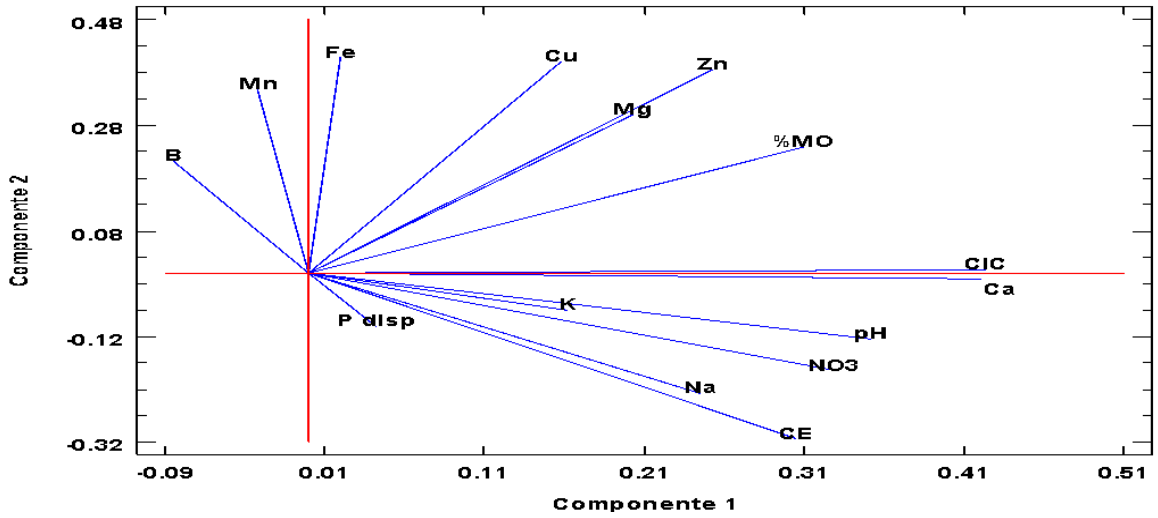


Figura 1. Asociación de nutrimentos de suelos en Filomeno Mata, Veracruz (2017).

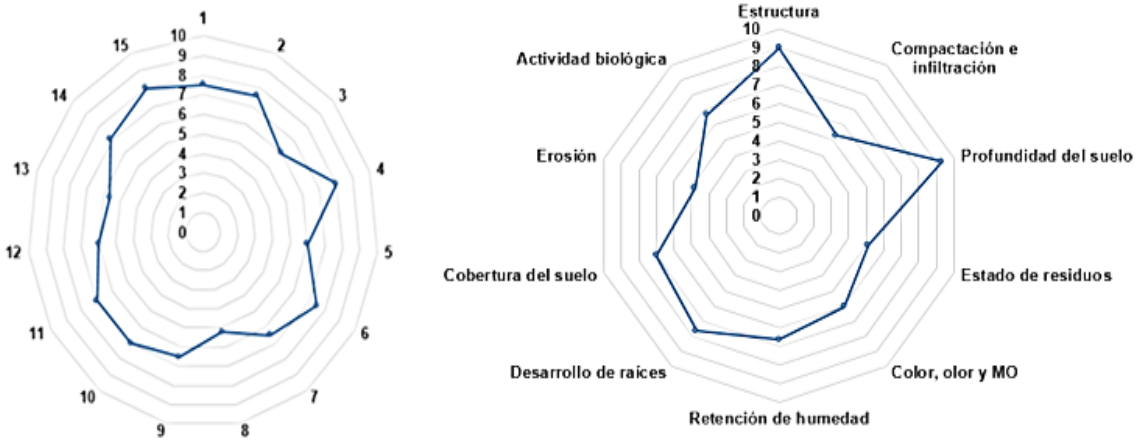


Figura 2. Calidad del suelo en áreas de cafetales en Filomeno Mata, Veracruz (2017).

CONCLUSIONES

En los suelos evaluados se detectó un déficit de N y K, así como bajos niveles de P y B, tal vez asociados al exceso de Ca, antagónico a estos dos últimos elementos. El Fe se halla en abundancia. La descomposición de la MO es lenta y contribuye a un desbalance en la disponibilidad de nutrientes. El análisis foliar revela deficiencias en N y Ca, con valores variables en otros nutrientes. Se identifican relaciones significativas entre distintos elementos del suelo, como: Mg-Zn; Cu-Mo; CIC-Ca; pH-N; Na-CE; Mn-B; Ca inversamente con B y P (Álvarez *et al*., 2017). Entre los factores positivos de calidad del suelo destacaron la buena estructura y profundidad. En contraste, los principales

aspectos limitantes son la erosión y el manejo deficiente de los residuos vegetales (Álvarez *et al*., 2017).

El uso de insumos químicos es limitado. En su lugar, se prioriza la aplicación de residuos vegetales y abonos orgánicos como bocashi y composta, a veces enriquecidos con soluciones nutritivas (Álvarez *et al*., 2017). Se hace necesario implementar prácticas agroecológicas que complementen las ya existentes, así como promover y valorar los saberes tradicionales como base para una gestión sostenible del suelo y la fertilidad (Álvarez *et al*., 2017).

BIBLIOGRAFÍA

Altieri, M. A. & Nicholls, C. I. (2002). Un método agroecológico rápido para la evaluación de la sostenibilidad de cafetales. *MIP y Agroecología. Costa Rica.* 64: 17-24.

Álvarez H., R., Galán R., M., Salazar T., J. C. & M. Jerónimo C. (2018). Evaluación de la fertilidad, calidad y sustentabilidad del suelo y salud de los cafetales. Centro de Investigación en Agricultura Orgánica, DGIP-UACh. Chapingo, México. Diciembre de 2018. 60 p.

Bertsch, F. 1998. Potasio, calcio y magnesio en el sistema suelo-café. Curso regional sobre nutrición mineral del café. IICA-PROMECAFE. San José, Costa Rica. 83-88 pp.

Castellanos, J. Z., Uvalle B., J. X. & Aguilar S., A. (2002). Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Colección INCAPA. San Miguel de Allende, Guanajuato. 226 p.

Etchevers B., J. D. (2000). Técnicas de diagnósticos útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. COLPOS, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

Nelson, W. L. (1989). Plant and Tissue testing principles relating to identification of nutrient deficiencies. *In*: Detecting Mineral Nutrient Deficiencies in Tropical and Temperate Crops, ed. D. L. Plucknett & H. B. Sprague, Westview Press Inc., Boulder, CO, USA. p. 23-40.

Noriega, A. G. (2007). Monografía: Árboles de sombra del agroecosistema cafetalero de Pluma Hidalgo, Oaxaca. México. UACh. Programa Universitario de investigación en Agricultura Sustentable. 1ª Ed. Pág. 4-10.

Sadeghian K., S. (2012). Efecto de los cambios en las relaciones de Ca, Mg y K intercambiables en suelos de la zona cafetera colombiana sobre la nutrición de café (*Coffea arabica* L.) en la etapa de almácigo. Doctor en Ciencias Agrarias. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

SEMARNAT. (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones ed. martes 31 de diciembre de 2002.

Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta, SIACON. (2014). Disponible en línea: http://www.siap.gob.mx/resumen-nacional-por-estado/ Consulta 18 de enero de 2018).

Villatoro L., M. O. (2014). Diagnóstico agroecológico de cafetales orgánicos en San Bartolomé Loxicha, Pochutla, Oaxaca. Tesis Profesional. Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Agroecología. Universidad Autónoma Chapingo. México. 96 p.

SUELOS CHERNOZEM Y AGRICULTURA TRADICIONAL EN ZONAS SEMIÁRIDAS

Carolina Elizabeth Ibarra Roque[1]; Rigoberto Castro Rivera[2]; José Pablo Lara Avila[1]; Gisela Aguilar Benítez[3]

[1] Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Agronomía y Veterinaria. Carretera San Luis-Matehuala Km. 14.5 Ejido Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P., México.
[2] Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada. Ex-Hacienda San Juan Molino Carretera Estatal Tecuexcomac-Tepetitla km 1.5.90700 Tlaxcala, Tlaxcala, México.
[2] Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Investigación de Zonas Desérticas. Altaír No. 200, Col. del Llano. 78377 San Luis Potosí, S.L.P, México.

Correo del autor de correspondencia: gisela.aguilar@uaslp.mx

RESUMEN

La distribución de suelos Chernozem en México se restringe a muy pequeñas áreas dispersas que representan apenas 1.3% de la superficie nacional. Su relevancia agrícola radica en su fertilidad natural, lo que es fundamental en regiones semiáridas en donde los suelos predominantes son someros y pedregosos. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar las propiedades físicas, químicas y biológicas de suelos Chernozem con uso para agricultura de temporal con cultivo de maíz en dos comunidades del Altiplano Potosino, con el fin de determinar si su fertilidad está disminuida por prácticas agrícolas inadecuadas. Se analizaron cuatro parcelas por comunidad. Se realizaron muestreos de suelo, recorridos de campo, análisis de laboratorio y estadísticos. Los resultados evidenciaron que el pH fue medianamente alcalino (7.7 a 8.1) y la conductividad eléctrica fue menor que 2 $dS \cdot m^{-1}$; por lo que no representan limitantes para la producción agrícola. La densidad aparente, contenido de materia orgánica y abundancia de unidades formadoras de colonia (UFC) con potencial para fijar nitrógeno fueron variables relacionadas con prácticas como aplicación de estiércol, rotación de cultivos, leguminosas arbóreas asociadas y vegetación en bordos intermedios o cortinas rompevientos. Se identificó un gradiente amplio de variación en los parámetros determinados entre las unidades de estudio, incluso dentro de la misma comunidad, en áreas con el mismo microclima. Lo anterior muestra que, la fertilidad de un suelo se mantiene con prácticas agrícolas adecuadas, sin recurrir a fertilización mineral. Sin embargo, aunque el sistema se considera tradicional, no todos los productores realizan buenas prácticas.

PALABRAS CLAVE: *Fertilidad; maíz; prácticas agrícolas.*

INTRODUCCIÓN

La interacción de factores biofísicos y ecológicos ha dado como resultado la formación de una amplia diversidad morfológica de suelos en México, cuya distribución es extremadamente compleja (Krasilnivok *et al.*, 2013). De esta forma, suelos que destacan por su alta fertilidad natural como los Chernozem se ubican en pequeñas áreas muy localizadas del Altiplano Potosino, una región semiárida en la que predominan los

Leptosoles y Phaeozems (INEGI, 2022). Los suelos Chernozem son muy fértiles debido a su alto contenido de carbono orgánico, se caracterizan por su color oscuro y baja densidad aparente. El contenido de materia orgánica oscila entre el 5 y 16%. El pH puede variar de 6.8 a 8.5 y el nitrógeno disponible ronda entre 0.2% y 0.5% (Martínez, 2020). Solo ocupan el 1.3% de la superficie nacional, distribuyéndose en todo el territorio (INEGI, 2007). En zonas semiáridas su presencia es poco común, ubicándose en zonas de transición entre clima semiárido y subhúmedo; aunque no tan desarrollados ni profundos, y en su mayoría suelen estar asociados a otras clases de suelos menos fértiles (INEGI, 2007; Pérez et al., 2019). Debido a sus propiedades físicas y químicas, estos suelos ofrecen un alto potencial para la agricultura. No obstante, cuando no se realiza un manejo adecuado, pueden presentar importantes problemas en los ciclos biogeoquímicos y pérdida de fertilidad (Cotler *et al*., 2020). Los mismos autores señalan que algunas de las propiedades más importantes que pueden ser alteradas con mayor facilidad son el pH y el contenido de materia orgánica y nitrógeno. Con base en lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar parámetros de fertilidad de suelos Chernozem con cultivo de maíz de temporal en dos comunidades del Altiplano Potosino, con el fin de explicar si su fertilidad está disminuida por prácticas agrícolas inadecuadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en el municipio de Villa Hidalgo, San Luis Potosí, entre las coordenadas 22º 26´ 55´´ N y 100º 40´ 45´´O; a 1,670 msnm. El clima dominante es semiseco cálido (BS1hw) con una temperatura media anual de 18 ºC, y precipitaciones estivales entre 300 y 400 mm. El suelo dominante es Leptosol, y la vegetación característica corresponde a matorral desértico micrófilo. Se seleccionaron como área de estudio las comunidades de Silos (al este) y Tanque de Luna (al sur), porque los productores practican agricultura tradicional en suelos que ellos mismos refieren como altamente productivos.

Para la caracterización ecológica se hizo un análisis espacial con el software ArcMap 10.8 con licencia de estudiante. Se elaboraron mapas de edafología, clima, uso de suelo y vegetación, utilizando capas de información geográfica de INIFAP-CONABIO (1995); García (1998) e INEGI (2021). Las prácticas agrícolas se documentaron mediante recorridos de campo y entrevistas estructuradas a productores, registrando frecuencias y porcentajes en el software Microsoft Excel®. Se efectuó un muestreo sistemático del suelo en cuatro parcelas de cada comunidad, posterior a la preparación del suelo y previo a la siembra. Las propiedades físicas y químicas fueron analizadas en el laboratorio del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), utilizando las técnicas AS-02 (pH), AS-03 (Dap), AS-07 (MO), AS-09 (textura) y AS-18 (CE) establecidas por la NOM-021-SEMARNAT (SEMARNAT, 2002). Para la determinación de nitrógeno inorgánico, fósforo asimilable y potasio extractable, se enviaron las muestras de suelo al Laboratorio Central Universitario de la Universidad Autónoma Chapingo. El registro del crecimiento bacteriano en el medio de cultivo sólido Burk se realizó en el laboratorio de Interacción Planta-Microorganismo de la UASLP. Utilizando el Software SPSS versión 24 para Windows, se realizó una comparación

múltiple de medias de Tukey con un nivel de significancia de P< 0.05. Utilizando el Software SPSS→ Ver 25 para Windows, se realizó una clasificación de las parcelas mediante un clúster jerárquico por el método de Ward, con el intervalo de distancia euclídea al cuadrado y una solución única de tres clústeres de pertinencia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con la información geográfica analizada, en ambos ejidos el clima predominante es de tipo BS, seco estepario (García, 2004). En cuanto al sub-clima en las áreas agrícolas, se observó que en Silos es Bs1hw (seco semicálido) y BS1ohw (árido semicálido) en Tanque de Luna. Estas diferencias climáticas se reflejan en el tipo de vegetación de las áreas circundantes a las parcelas; en Silos predomina el matorral crasicaule (MC), mientras en Tanque de Luna domina el mezquital xerófilo (MX).

Con base en el mapa de edafología, se identificó que los suelos predominantes son los Leptosoles en el ejido de Silos y Phaeozem en Tanque de Luna. Sin embargo, en ambos ejidos el 95% de la agricultura de temporal se encuentra situada en pequeñas áreas de suelos Chernozem. Este tipo de suelo es considerado por los agricultores como muy fértil y con una alta capacidad productiva.

El sistema de producción es tradicional en las dos comunidades de estudio, porque el destino de la producción es el autoconsumo familiar, la mano de obra es familiar, la dependencia de insumos externos es muy baja, se utiliza semilla criolla y el conocimiento ecológico es alto (Pillado *et al.*, 2022; Salazar, 2024). A pesar de las características antes descritas, se identificaron prácticas agrícolas que reflejan una transición hacia la agricultura convencional, como el establecimiento del monocultivo de maíz y la labranza mecanizada del suelo. En relación con la mecanización, aunque limitada a dos eventos por ciclo, puede inducir a la compactación en suelos arcillosos como los de Silos, en donde también se registró el subsoleo como práctica aislada. En la misma comunidad se observaron prácticas agrícolas como la incorporación de humus de lombriz y el establecimiento de barreras vivas (agave), que se han realizado en los últimos tres años con el objetivo de retener el agua de lluvia. Esto se debe a capacitaciones gubernamentales y/o al conocimiento compartido por otros agricultores.

En el ejido de Tanque de Luna se registró el uso esporádico de fertilizantes y herbicidas. También es más común la rotación de cultivos con avena y cebada, lo que puede influir de manera positiva en la dinámica y el reciclaje de nutrientes. Sin embargo, su principal enfoque es forrajero.

En relación con el resultado de las propiedades físicas, se identificaron suelos arcillosos en Silos y suelos francos en Tanque de Luna. Dicha diferencia puede estar relacionada con la arcilla de origen, al clima y al relieve. Los resultados de densidad aparente mostraron que los valores más altos se encontraron en las parcelas de Silos (1.2 a 1.6) y los más bajos en Tanque de Luna (0.9 a 1.5), según lo establecido por la NOM-021-RECNAT (SEMARNAT, 2002). Lo anterior puede atribuirse a factores como el bajo contenido de MO, la textura y las prácticas de manejo que influyen en el aumento de la densidad aparente; lo que concuerda con las observaciones de Romero *et al.*,2015.

De acuerdo con Martínez *et al*. (2022), los valores reportados para los suelos Chernozem oscilan entre 5 y 16% de materia orgánica. No obstante, los valores de MO en las parcelas de análisis no concuerdan con los rangos anteriormente mencionados. En Silos el contenido de MO se encontró en un rango de 1.3 a 2.5%, y en Tanque de Luna fue de 0.93 a 3.16%. Estas diferencias pueden atribuirse al manejo agrícola, ya que las parcelas con el contenido más alto son aquellas en las que se realiza una o varias prácticas como incorporación de estiércol, rotación de cultivos y vegetación en bordos.

El rango de valores de pH (7.7 a 8.2) ubica a los suelos analizados como ligeramente alcalinos (DOF, 2000). Al respecto, Ibarra *et al.* (2009) mencionan que los suelos medianamente alcalinos son muy comunes en las zonas semiáridas debido a la baja precipitación y a la acumulación de sales. En cuanto a los valores de CE (< 2 dSm^{-1}), correspondieron con suelos muy ligeramente salinos. En relación con el contenido de nitrógeno, el conjunto de muestras analizadas presentó valores muy bajos (7.7 a 14 mg kg^{-1}). Algunos de los factores que pueden estar influyendo en esta propiedad son el contenido de MO y el pH. En el caso del P (Olsen) y K todas las muestras presentaron valores muy altos, lo cual puede atribuirse a la composición natural del suelo (Calvo, 2017; SEMARNAT, 2002).

Con base en el conteo de las Unidades Formadoras de Colonia (UFC), se observaron diferencias cuantitativas entre parcelas y ejidos. En las muestras de las parcelas de Tanque de Luna se contó una mayor cantidad de UFC, lo que evidencia una mayor proporción de bacterias con potencial para fijar nitrógeno.

Los resultados mostraron una separación de parcelas por comunidad, las unidades de Tanque de Luna deben su similitud al alto contenido de materia orgánica y mayor número de UFC.

AGRADECIMIENTOS

A los productores cooperantes y las autoridades ejidales de Silos y Tanque de Luna, por autorizar y facilitar el desarrollo de esta investigación.

CONCLUSIONES

Los análisis estadísticos evidencian que las parcelas con mayor contenido de materia orgánica y unidades formadoras de colonia con potencial para fijar nitrógeno fueron aquellas en las que se realizan prácticas como la incorporación de abonos orgánicos o estiércol, rotación de cultivos y establecimiento de bordos vivos.

BIBLIOGRAFÍA

SEMARNAT (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, "que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos". Estudio, muestreo y análisis" publicado en el Diario Oficial de la Federación el 31 de diciembre de 2002.

García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.

Martínez, S. R. A. (2020). Caracterización fisicoquímica de un Chernozem bajo diferentes usos del suelo en el noreste de México. Tesis de Maestría en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Pp. 54.

Martínez, S. R. A., Yáñez, D. M. I., Cantú, S, I., González, R. H. & Marmolejo, M J. G. (2022). Effects of different land-use systems on soil physicochemical properties of a Chernozem in Northeast Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25: 1-15 *http://doi.org/10.56369/tsaes.4115.*

Pérez, S. J. E., Rodríguez, F. R., López, S. A., Torres, G. J. A., Meraz, J. A. D. J., Díaz, R. A. & Valdivia, M. O. (2019). Erodabilidad y riesgo de erosión de suelos negros del centro de México: estudio de un Phaozem. *Terra Latinoamericana*, 37(4), 391-400.

Pillado, A. K. V., Albino, G. R., Santiago, M. H. & Pedraza, M. J. (2022). Elementos bioculturales, base para la adaptación del sistema MIAF en la zona mazahua del Estado de México. Estudios sociales. *Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional,* 32(60), 221-247. https://doi.org/10.24836/es.v32i60.1247.

Salazar, M. M. (2024). Análisis de los servicios ecosistémicos de los agroecosistemas tradicionales en Villa Hidalgo, S.L.P. Tesis de maestría, Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Pp 113.

Krasilnikov, P., Gutiérrez, C. M. C., Ahrens, J. R., Cruz, G. C. O., Sedov, S., Solleiro, R. E. (2013). The soils of Mexico. World Soils Book Series. Springer Dordrecht. Pp. 182. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5660-1.

RETENCIÓN DE AGUA EN EL SUELO Y POTENCIAL RECARGA AL ACUÍFERO MEDIANTE SISTEMAS AGROFORESTALES EN GUANAJUATO

Aldo Yair Pulido Esquivel[1]; Jorge Víctor Prado Hernández[2]; Julio Cesar Buendia Espinoza[2]; Rosa María García Núñez[3]

[1] Centro Agroforestal para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco 56230, México.
[2] Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco 56230, México.
[3] Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco 56230, México.

Correo del autor de correspondencia: tuhuertoconaldo@gmail.com

RESUMEN

Este estudio evalúa la retención de humedad del suelo y la recarga potencial de acuíferos en dos sistemas agroforestales, en comparación con un sistema tradicional de maíz de temporal en la región semidesértica de Celaya, Guanajuato, México. Las mediciones de campo del 3 de agosto al 12 de octubre de 2022 incluyeron la precipitación, la humedad del suelo a múltiples profundidades y las propiedades físicas del suelo en siete coberturas vegetales. Los resultados muestran un contenido de humedad significativamente mayor, una mejor uniformidad y un mayor potencial de recarga bajo especies arbóreas como *Bursera graveolens* y *Lysiloma divaricatum*.

PALABRAS CLAVE: *agua del suelo; acuíferos agotados; infiltración; gestión del suelo; servicios hidrológicos; resiliencia climática.*

INTRODUCCIÓN

Los sistemas agroforestales (SAF), que integran árboles con cultivos o ganado, son ampliamente reconocidos por sus beneficios multifuncionales, ya que mejoran la calidad del suelo, brindan servicios ecosistémicos y regulan los ciclos hidrológicos (Achary *et al*., 2018).

Las investigaciones han demostrado que la agroforestería puede mejorar las tasas de infiltración, reducir la escorrentía y aumentar la recarga de los acuíferos en comparación con la agricultura convencional (Ríos-Ramírez *et al*., 2008). Sin embargo, estos hallazgos se basan principalmente en estudios de casos globales y su relevancia para entornos áridos y semiáridos sigue siendo limitada (Shulka *et al*., 2006). Luna-Robles *et al*. (2011) han abordado las propiedades del suelo y la infiltración a escala local, pero no se ha intentado una síntesis nacional por tipo de vegetación o zona climática. El agotamiento de los acuíferos es particularmente grave en las regiones semiáridas del centro de México.

Este estudio busca cuantificar la retención de humedad del suelo y la recarga potencial de acuíferos en el Valle de Celaya en condiciones semiáridas mediante la evaluación de dos sistemas agroforestales y un sistema convencional de maíz de temporal. Las configuraciones agroforestales difieren en cuanto a la composición de la vegetación y la disposición espacial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. Este estudio se realizó en el Campo Experimental Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Celaya, Guanajuato, México.

Diseño experimental. El diseño fue completamente aleatorizado con un arreglo combinatorio asimétrico de dos factores correspondientes a dos sistemas agroforestales y una parcela de control convencional.

Sistemas estudiados. El primer sistema agroforestal (AR) fue un arboreto denso establecido con árboles plantados a una distancia de 3 × 3 m. La composición de especies incluyó *Prosopis laevigata* (mezquite), *Bursera graveolens* (copal) y *Leucaena esculenta* (huaje). El segundo sistema (AIC) fue una configuración agroforestal intercalada, donde los árboles se espaciaron a 5 × 3 m e intercalaron con maíz (*Zea mays*). El sistema AIC incluyó *Prosopis laevigata, Lysiloma divaricatum* (palo prieto) y *Hesperalbizia occidentalis* (palo blanco) como principales componentes arbóreos. La parcela de control fue un campo de maíz convencional.

Medición de especies de árboles. El 15 de septiembre de 2022, se midieron el diámetro, la altura y la copa de los árboles utilizando una cinta métrica y una aplicación móvil gratuita llamada HabitApp.

Medición de variables edafológicas y climáticas. Las mediciones en el sitio experimental se realizaron entre el 3 de agosto y el 12 de octubre de 2022.

Caracterización del suelo. En el laboratorio, la textura se determinó mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos, la densidad aparente se midió mediante el método de muestreo de núcleos y la densidad real se calculó con un picnómetro. El contenido de carbono orgánico se estimó mediante el método de Walkley-Black.

Contenido de humedad del suelo. El contenido de humedad del suelo se midió en cinco fechas: 3 de agosto, 17 de agosto, 15 de septiembre, 28 de septiembre y 12 de octubre de 2022, designadas como fechas 1, 2, 3, 4 y 5, respectivamente. El contenido de humedad volumétrica se midió utilizando un reflectómetro en los puntos de intersección de dos mallas rectangulares perpendiculares de 150 cm de largo y 30 cm de profundidad en el sistema agroforestal denso y de 150 cm de largo y 30 cm de profundidad en el sistema agroforestal AIC. La precipitación se midió con estación meteorológica Davis Vantage pro-2®.

Uniformidad de la distribución de la humedad del suelo. Se calculó el coeficiente de uniformidad de Christiansen:

$$CU_C = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} |\theta_i - \theta|}{n\theta}\right] \times 100 \qquad (1)$$

donde CU_C es el coeficiente de uniformidad de Christensen, θ es la humedad promedio del suelo, θ_i es la humedad promedio del suelo del i-ésimo sitio de medición y n es el número de sitios de medición.

Profundidad de recarga potencial del acuífero. La profundidad de recarga potencial del acuífero se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$LRPA = (\theta_{obs} - \theta_{cc}) \times 1cm \,|\theta_{obs} \geq \theta_{cc} \qquad (2)$$

donde LRPA es la profundidad potencial de recarga del acuífero (cm), θ_{obs} es la humedad promedio observada del suelo y θ_{cc} es la humedad del suelo a capacidad de campo (Saxton y Rawls, 2006).

Análisis estadístico. Se evaluó el contenido de humedad del suelo a tres profundidades (10, 20 y 30 cm) bajo siete coberturas vegetales, durante cinco fechas, promediando las 12 réplicas a cada profundidad y cobertura vegetal. Se utilizó una ANOVA y una comparación múltiple de Tukey con un valor $p < 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características de las especies arbóreas. Las especies arbóreas incluidas en cada sistema agroforestal presentaron atributos estructurales distintivos que probablemente influyeron en sus respectivos rendimientos hidrológicos. En el sistema Ar, *Bursera graveolens* y *Leucaena esculenta* exhibieron altos valores de cobertura del dosel (73.8% y 75.2%, respectivamente), a pesar de tener diámetros y alturas de copa moderados (4,04 m y 3.83 m de diámetro; 4,34 m y 3,90 m de altura).

En contraste, el sistema AIC incluyó especies como *Hesperalbizia occidentalis* y *Lysiloma divaricatum*, que alcanzaron mayores alturas (6 m y 4.7 m) y tienen diámetros de copa más amplios (7.51 m y 6.25 m), *Prosopis laevigata* presentó una cobertura de dosel en el sistema AIC (58,05%).

Características del suelo. Según la clasificación del USDA (Saxton y Rawls, 2006), la textura del suelo es arcillosa. El sistema Ar presentó el mayor contenido de carbono orgánico en el horizonte A (2.61%), seguido del sistema AIC (1.30%) y el control (1.04%). En consecuencia, la porosidad total en el horizonte A fue del 33.23% para Ar, del 32.68% para AIC y del 28.9% para el control.

Comportamiento del contenido de humedad del suelo. En la Figura 1 se observa que la humedad en el control no superó los 55 cm elevado al cubo entre cm, menos 3 final superíndice, mientras que bajo las coberturas arbóreas lograron superar los 60 cm elevado al cubo entre cm superar los 60 cm^3/cm^{-3}. La humedad bajo las coberturas arbóreas se mantuvo más tiempo bajo el valor de saturación de 50 cm^3/cm^{-3}obtenido por Saxton y Rawls (2006) que el control.

Uniformidad de la distribución de la humedad en el suelo. La humedad agroforestal densa (Ar) bajo la cobertura de *Prosopis leaviagata* y bajo la cobertura de *Bursera graveolens* no presentó diferencias estadísticas con el suelo control, pero sí presentó diferencias con la humedad bajo la cobertura *de Leucaena esculenta* en el sistema Ar y con la humedad bajo la cobertura de las tres especies en el sistema AIC (Figura 2).

Recarga Potencial del Acuífero. Existe una diferencia significativa en la recarga potencial en las fechas de mayor precipitación, que fueron el 15 de agosto de 2022 y el 7 de septiembre de 2022 (Cuadro 1).

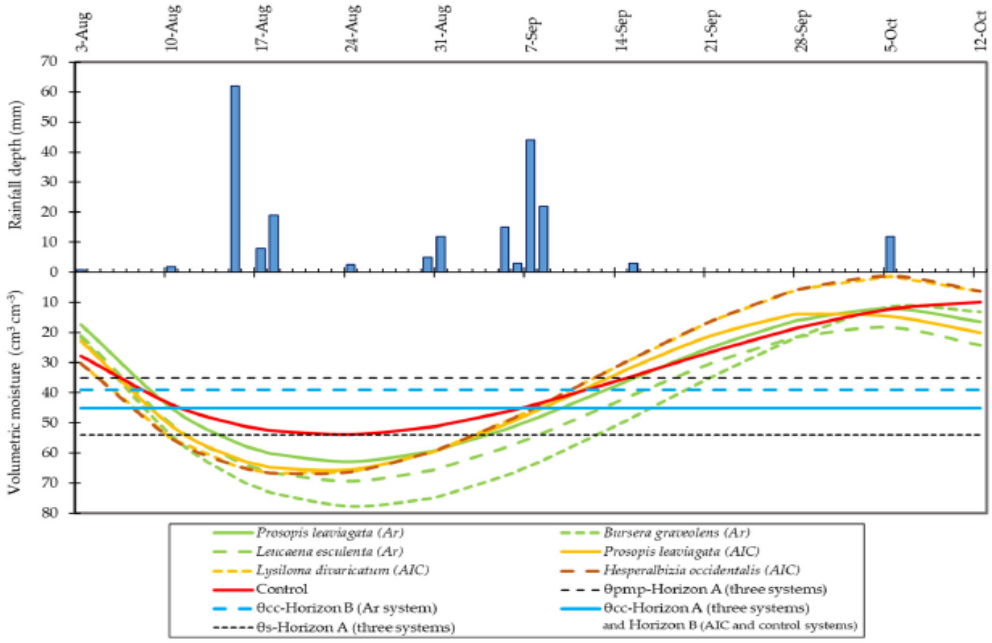


Figura 1. Tendencias en el comportamiento del contenido de humedad promedio.

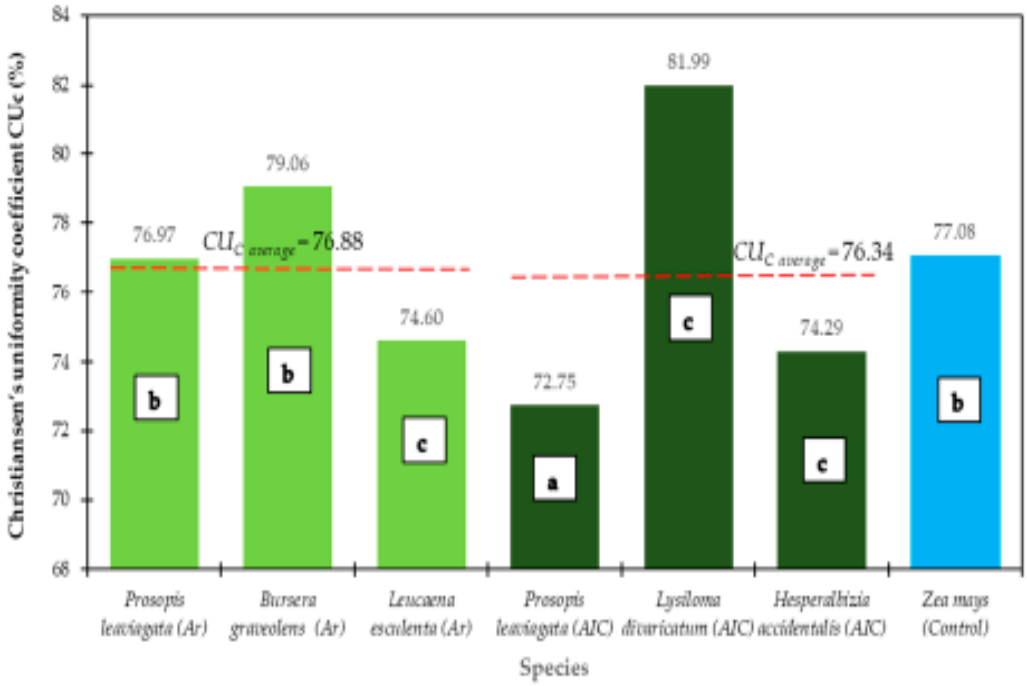


Figura 2. Uniformidad de la distribución promedio de la humedad del suelo.

Cuadro 1. Recarga potencial del acuífero

Cobertura	Recarga ($cm\ cm^{-1}$)	
	15/08/22	**7/09/22**
Prosopis leaviagata Ar[b]	14.06	0.00
Bursera graveolens Ar[a]	25.98	6.03
Leucaena esculenta Ar[a]	19.77	0.00
Prosopis leaviagata AIC[a]	21.45	0.00
Lysiloma divaricatum AIC[a]	23.88	0.00
Hesperalbizia occidentalis AIC[a]	23.47	0.00
Control[b]	9.64	0.00

CONCLUSIONES

Se ha demostrado que los sistemas agroforestales mejoran las propiedades estructurales del suelo y las funciones de regulación hídrica en condiciones agrícolas semiáridas. Existe una correlación positiva entre el carbono orgánico del suelo y la porosidad, y se observa una mejora en el comportamiento hidráulico de los suelos gestionados mediante agroforestería, lo que indica que la integración de vegetación leñosa en los sistemas de cultivo puede promover condiciones favorables para la recarga de acuíferos.

BIBLIOGRAFÍA

Achary, B.S., Kharel, G., Zou, C.B., Wilcox, B.P. & Halihan, T. (2018). Woody Plant Encroachment Impacts on Groundwater Recharge: A Review. *Water, 10*(10), 1466. https://doi.org/10.3390/w10101466.

Luna-Robles, E., Cantú-Silva, I., Yáñez-Diaz, M.I., González-Rodríguez, H., Marmolejo-Monsiváis, J.G. & Béjar-Pulido, S.J. (2020). Ajuste de modelos empíricos de infiltración en un Umbrisol bajo diferentes tratamientos silvícolas. *Revista Mexicana de Ciencia Forestales*, *11*(57), 132–152. https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i57.643

Ríos-Ramírez, N., Andrade-Castañeda, H.J. & Ibrahim, M. (2008). Evaluación de la recarga hídrica en sistemas silvopastoriles en paisajes ganaderos. *Zootecnia Tropical*, *26*(3), 183–186. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_serial&pid=0798-7269&lng=es&nrm=iso.

Saxton, K.E. & Rawls, W.J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, *70*(5), 1569–1578. https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117.

Shulka, M.K., Lal, R., Ebinger, M. & Meyer, C. (2006). Physical and chemical properties of soils under some pinon-juniper-oak canopies in a semi-arid ecosystem in New Mexico. *Journal of Arid Environments*, *66*(4), 673–685. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.12.002.

EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA Y EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN CULTIVO DE AMARANTO (*Amaranthus hypochondriacus*)

Edgar Barrales Brito[1]; Claudia Hidalgo Moreno[1]; José Sergio Barrales Dominguez[2]; Jorge Etchevers Barra[1]; Diana Rosa Santillán Balderas[1]

[1] Posgrado en Edafología. Colegio de postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México
[2] Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Fitotecnia, Chapingo, Estado de México.

Correo del autor de correspondencia: barrales.edgar@colpos.mx

RESUMEN

El cambio climático impacta en la agricultura por la alteración de las condiciones climáticas que afectan la producción agrícola de temporal, además, la pérdida de materia orgánica en el suelo por las prácticas agrícolas ha ocasionado que los suelos pierdan la reserva de sus nutrientes y la capacidad de retener agua, limitando la producción. El amaranto ha tenido un auge en la zona de Cuapiaxtla, Tlaxcala, por sus bondades nutricionales, su capacidad de adaptarse a condiciones limitantes de agua y su producción de una gran cantidad de biomasa que se incorpora a los suelos posterior a su cultivo. Con la finalidad de medir la eficiencia en el uso del agua en la producción de biomasa total y la emisión de gases de efecto invernadero en el cultivo de amaranto, se estableció un experimento en la localidad de Cuapiaxtla, Tlaxcala, con tres variedades y a diferentes dosis de fertilización de N, P_2O_5, y K_2O (80-40-20 y 46-00-00). El amaranto en condiciones de temporal (600 mm anuales) presentó rendimientos entre 1.5 y 2 toneladas de grano por hectárea, además de que la producción de biomasa total fue de entre 10 y 12 toneladas por hectárea. La emisión de gases de efecto invernadero varió entre 30 y 50 kg de CO_2 ha^{-1} $día^{-1}$, y en el caso de N_2O fue de 9 g de N_2O ha^{-1} $día^{-1}$. La alta cantidad de CO_2 se debe a la mineralización de la materia orgánica del suelo y la cantidad de N_2O es baja por las bajas dosis de fertilización que se aplican en la zona de Cuapiaxtla, Tlaxcala.

PALABRAS CLAVE: *Captura de carbono, emisión de gases de efecto invernadero, materia orgánica, productividad.*

INTRODUCCIÓN

La agricultura de temporal enfrenta retos importantes si se quiere alcanzar la soberanía alimentaria. En México, el 75 % de la agricultura es de temporal (INEGI, 2007) y el cambio climático produce afectaciones a la agricultura por el incremento de las temperaturas, la alteración en las precipitaciones anuales, así como en la aparición de plagas y enfermedades en los cultivos (Bhadouria *et al.* 2019; Chen *et al.* 2024; Malhi, Kaur y Kaushik *et al.* 2021). La eficiencia de uso del agua (EUA) es un indicador que mide la relación de la producción de biomasa o rendimiento respecto a la evapotranspiración (Loomis y Connors, 2002). Es un parámetro que permite evaluar la eficiencia con que los cultivos aprovechan el agua para la producción de biomasa y es un indicador para saber

la cantidad de agua de riego que se debe aplicar. Bajo las condiciones limitantes en las precipitaciones, es necesario evaluar cultivos que tengan una alta eficiencia en el uso de agua.

El suelo es un factor importante en la producción de alimentos, en la regulación de los ecosistemas. Las prácticas agrícolas han ocasionado la degradación de sus propiedades, por lo que es necesario optar por prácticas sostenibles que mejoren la fertilidad de los suelos e incrementen los rendimientos; además, están dentro de los objetivos de desarrollo sostenible de la ONU para alcanzar la sostenibilidad (FAO, 2017).

El 80% de los suelos en México presentan al menos un grado de erosión, siendo la agricultura la actividad principal responsable de la pérdida de la fertilidad del suelo, debido a las practicas intensivas de monocultivo y la disminución de las entradas de materia orgánica, los cuales impactan en los bajos rendimientos en la producción de granos y otros cultivos (Lal, 2016). Lo anterior hace que se requiera implementar cultivos que se adapten a las condiciones climáticas actuales y que además ayuden a mejorar las propiedades de los suelos agrícolas, al incrementar las entradas de materia orgánica.

El amaranto es un cultivo en el que se ha considerado como un súperalimento por sus propiedades nutricionales, alto contenido de proteína, vitaminas, hierro y calcio (Mapes *et al.*, 2012), por lo que es una opción alimenticia para disminuir la desnutrición en regiones marginadas de México. Por su producción, se le considera un cultivo con alto potencial de adaptabilidad a las condiciones climáticas, puesto que resiste hasta cierto grado las sequías, heladas y granizadas (Monroy *et al.*, 2021), además de que es un cultivo que se puede producir bajo condiciones limitadas de agua. En la localidad de Cuapiaxtla, Tlaxcala, se ha establecido el cultivo de amaranto en los últimos años por sus bondades; sin embargo, no se ha evaluado la emisión de gases de efecto invernadero por este cultivo y la cantidad de biomasa total que se incorpora al suelo como residuos de cosecha en los últimos años. Y en la zona de estudio, los residuos de cosecha del cultivo de amaranto no tienen un uso, por lo que la totalidad de los residuos se incorporan al suelo, por lo que pueden tener un potencial en mejorar las propiedades del suelo.

Con el objetivo de evaluar la eficiencia del uso del agua en la producción de grano y biomasa total en cultivo de amaranto y estimar la cantidad de materia orgánica que se incorpora a los suelos después de cada ciclo agrícola. Se evaluó la EUA en el cultivo de amaranto en la producción de biomasa total y rendimiento de grano de tres variedades de amaranto con diferentes dosis de fertilización en suelos de la localidad de Cuapiaxtla, Tlaxcala, y la emisión de gases de efecto invernadero por el cultivo de amaranto.

MATERIALES Y MÉTODOS

Establecimiento del experimento. En la localidad de Cuapiaxtla, Tlaxcala, en 2024 se estableció un lote experimental con tres variedades de amaranto que se siembran en la zona (Areli, PQ2 y Diego). En parcelas de 40 m^2 se probaron dos dosis de fertilización: 80, 40, 20 (D2) y 46, 00, 00 (D1), con N (urea), P_2O_5 y K_2O, que son las que aplican los productores y un testigo sin fertilizar, con tres repeticiones por tratamiento, con un total de 27 unidades de evaluación. La fertilización se realizó en dos aplicaciones: una a los 5 días después de la emergencia de la planta y a los 60 días de edad de la planta.

Se tomó una muestra compuesta de suelo y se evaluó sus parámetros físicos: textura (por el método de Bouyoucos), densidad aparente (con el método del cilindro de volumen conocido), humedad a capacidad de campo (CC) por el método de la olla de presión y punto de marchitez permanente (PMP) por el método de la membrana de la olla de presión. Parámetros químicos: pH (en agua relación 2:1), Carbono orgánico del suelo (con analizador Toc-Shimadzu), P (Bray), N (Kjeldahl) y microelementos de acuerdo a la NOM-021-RECNAT-2000.

Evaluación de la eficiencia del uso del agua (EUA). En las parcelas experimentales se evaluó la EUA de las tres variedades, para ello, se midió la biomasa total e índice de cosecha. La eficiencia en el uso del agua (EUA) para biomasa total se calculó considerando las relaciones EUA = BT/ETc. La evapotranspiración del cultivo (ETc) se estimó utilizando datos de las estaciones meteorológicas cercanas del Servicio Meteorológico Nacional, (Temperatura, precipitación y evaporación); y el valor de evapotranspiración se calculó con la evaporación multiplicándose por 0.8 y el valor de coeficiente del cultivo (Kc).

Gases de efecto invernadero (GEI). Se hicieron dos mediciones, una durante la temporada de lluvias (junio) y otra en la temporada seca después de la siega (octubre). Se colocaron cámaras estáticas en campo. Se colocó una cámara en la parcela testigo (T) y tres cámaras en las parcelas con la dosis de fertilización mayor (D2). Se tomaron muestras de gases en viales de 10 ml en diferentes tiempos (0, 10, 20 y 30 min) y se midió la concentración de CO_2, CH_4 y N_2O con un cromatógrafo gases Shimadzu GC-2014. Se tomaron datos del diámetro y altura de las cámaras para el cálculo de los flujos de gases de efecto invernadero.

RESULTADOS

Datos agroclimatológicos. La temperatura máxima fue en el mes de mayo con 31.7 °C y la mínima fue el 12 de octubre con -0.7 °C. La precipitación durante todo el ciclo agrícola de mayo a octubre, tiempo en el que la agricultura de temporal se desarrolla en la zona, fue de 351 mm con una evaporación de 842 mm. En la Figura 1 se observó que en las primeras etapas de desarrollo del cultivo de junio y julio se presentaron lluvias; sin embargo, en la etapa de floración del cultivo de amaranto (mes de agosto) las precipitaciones fueron muy bajas (10-12 mm), lo que afectó el rendimiento.

Propiedades del suelo. Los parámetros de suelos iniciales provenientes de un suelo donde no se ha cultivado amaranto y en los últimos 10 años se ha cultivado maíz, se presentan en el Cuadro 1. El suelo tiene una textura franca arcillosa, con una densidad aparente de 1.3 $g \cdot cm^{-3}$. valor de pH de 5.9, ligeramente ácido, bajo contenido de materia orgánica (0.75%). En cuanto a los parámetros físicos de retención de humedad, estos suelos tienen un contenido de humedad a capacidad de campo de 21%, el punto de marchitez permanente es de 12.7%, por lo que la humedad aprovechable es de únicamente 8.6% son suelos que tienen poca retención de humedad, por lo que la pérdida de humedad por evaporación es muy alta cuando el suelo está descubierto en las primeras etapas de desarrollo de los cultivos.

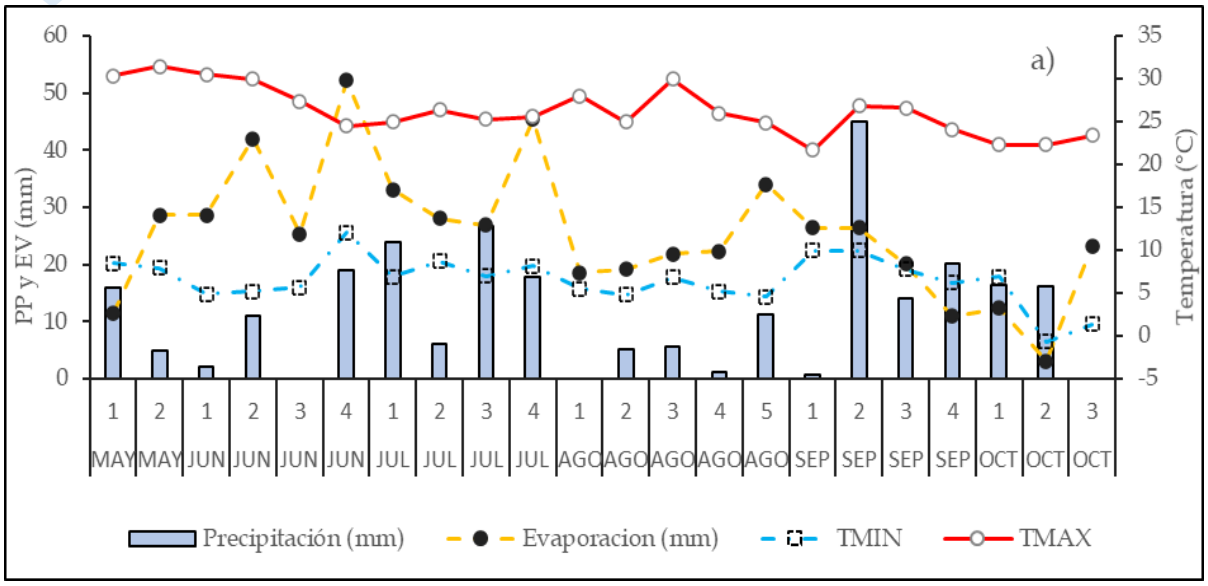


Figura 1. Condiciones meteorológicas durante el desarrollo del experimento.

Cuadro 1. Propiedades químicas del suelo.

Elemento	pH	MO	P-Bray	K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mn	Cu	B	Al	S	N-NO3
		%					ppm								
valor	5.9	0.75	98	212.0	660.0	138.0	32.0	45.2	1.4	12.1	1.0	0.1	7.2	36.0	7.4

Eficiencia del uso del agua (EUA). El crecimiento del cultivo de amaranto obtuvo buenos rendimientos para las condiciones climáticas locales, siendo la variedad Areli la que obtuvo un mayor rendimiento de 2250 kg de semilla por hectárea en comparación con las otras dos variedades. El índice de cosecha estuvo en valores de 9% (variedad Diego con el testigo), a 25% (variedad PQ2 con la dosis de fertilización D2). La eficiencia del uso del agua tiene una variación de 4.4 (PQ2) a 5.5 (Areli) g de semilla por m² por mm de lluvia, con la mayor dosis de fertilización aplicada (Cuadro 2). En los tratamientos sin la aplicación de fertilizante, la EUA en producción de semilla fue de 2.3 a 2.8 g de semilla por m² por mm en las variedades Diego y Areli, respectivamente, y el rendimiento fue de 900 kg de semilla de amaranto por hectárea.

La producción de biomasa total con mayor dosis de fertilización está en los valores de 8 a 12 toneladas por hectárea. A pesar de que el forraje de amaranto tiene cualidades para la alimentación del ganado (Pulgarin *et al.*, 2024; Gabriel *et al.*, 2018; García *et al.*, 2009), en la zona de Cuapiaxtla, Tlaxcala, el cultivo de amaranto no se aprovecha el forraje para la alimentación de ganado, como en el caso de otros cultivos, por lo que cerca del 70% de la biomasa total es incorporada a los suelos en donde se cultiva posterior a la cosecha, lo que puede significar una buena opción para incrementar el contenido de materia orgánica en los suelos.

Cuadro 2. Datos de producción de biomasa y eficiencia del uso del agua en cultivo de amaranto en Cuapiaxtla, Tlaxcala.

Variedad	Tratamiento	Producción (kg)	Biomasa total (kg)	IC	EUA Semilla ($g\ m^{-2}\ mm^{-1}$)	EUA BT ($g\ m^{-2}\ mm^{-1}$)
Areli	D2	2250.0	12431.7	18.1	5.5	30.5
	D1	1408.3	9765.0	14.4	3.5	24.0
	T	1158.3	9280.2	12.0	2.8	22.8
PQ2	D2	1775.0	6913.7	25.6	4.4	17.0
	D1	1316.7	6985.5	18.9	3.2	17.1
	T	958.3	6618.2	14.4	2.4	16.2
Diego	D2	1845.8	8285.8	22.4	4.5	20.3
	D1	1654.2	11309.2	14.6	4.1	27.8
	T	933.3	9527.2	9.7	2.3	23.4

*D= Dosis de fertilización D2= 80-40-20; D1=46-00-00. T=Testigo (00-00-00).

Emisión de gases de efecto invernadero. Los datos de las emisiones de gases de efecto invernadero por parte del suelo se presentan en la Figura 2. En las emisiones de CO_2 en el cultivo de amaranto se observó un incremento en el tratamiento con la mayor dosis de fertilización en comparación con el testigo, la emisión fue de 50 kg CO_2 ha^{-1} $día^{-1}$ para el caso de Arely y cercano a 30 kg CO_2 ha^{-1} $día^{-1}$ para la variedad PQ2, durante la estación de lluvias. Las emisiones de CO_2 en el cultivo de amaranto son por la cantidad de materia orgánica que se está incorporando en la superficie del suelo y por el contenido de materia orgánica de residuos de cosechas anteriores (Ortiz *et al.* 2015, Benedicto *et al.* 2019). En el caso del óxido nitroso, las emisiones fueron de 9 g N_2O ha^{-1} $día^{-1}$ en la variedad Areli y de cerca de 7 g N_2O ha^{-1} $día^{-1}$ en los tratamientos con mayor fertilización en la estación de lluvias. Las emisiones disminuyen durante la estación seca.

Las emisiones de GEI´s en el cultivo de amaranto, está relacionado con la cantidad de fertilizantes que se utiliza en la producción, sin embargo, la dosis recomendada de 80-40-20, casi no es utilizada por los productores por los altos precios de los insumos agrícolas y la mayoría opta por únicamente aplicar la dosis de 46-00-00, lo que puede significar una menor emisión de N_2O. La emisión de CO2 es resultado de la incorporación de los residuos de cosecha y durante la época de lluvias se mineraliza; posteriormente, la emisión de CO_2 disminuye durante la temporada de secas.

Las emisiones de CH_4 dieron resultados negativos ya que en los puntos de la cromatografía no dan valores en la concentración de este gas de efecto invernadero, por lo que se puede asumir que no hay emisión de este gas de efecto invernadero en el cultivo de amaranto, por las condiciones del suelo y el proceso de descomposición de la materia orgánica.

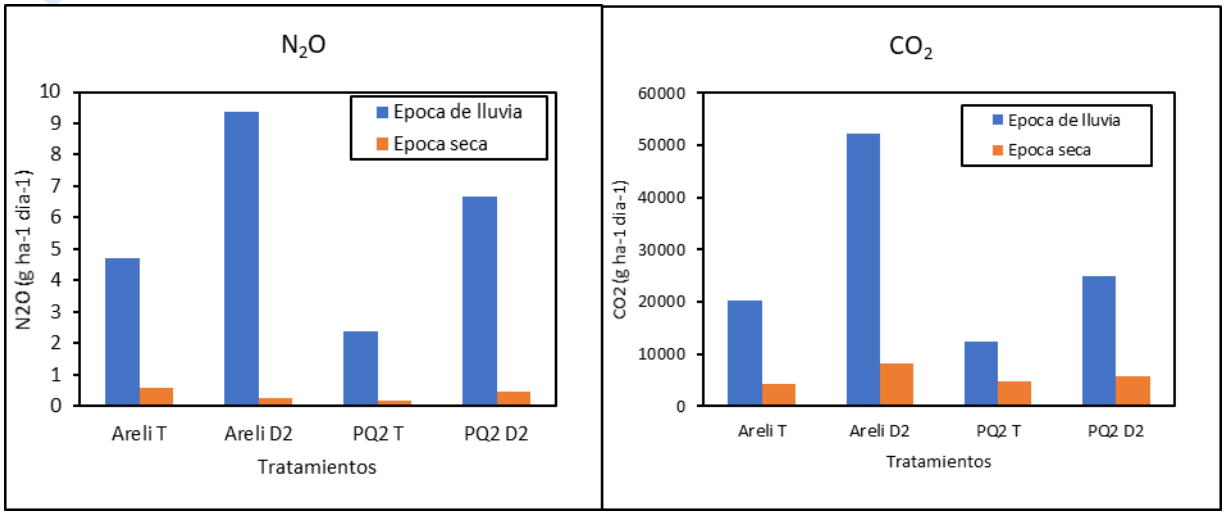


Figura 2. Emisión de gases de efecto invernadero en cultivo de amaranto, en época de lluvias y época seca, posterior a la cosecha.

CONCLUSIONES

El cultivo de amaranto tiene una alta eficiencia del uso de agua, con la precipitación de 355 mm de agua que se da en la zona; los rendimientos en el cultivo de amaranto fueron de 2 toneladas por hectárea. Por lo que en agricultura de temporal significa un cultivo alternativo para adaptarse a las condiciones climáticas actuales. Con la dosis de fertilización de 80-40-20, se incrementaron los rendimientos al doble en comparación con el testigo y las emisiones de N2O se incrementaron en proporción a la cantidad de fertilizante aplicado.

La cantidad de biomasa total por el cultivo de amaranto significa una adición de materia orgánica al suelo de 12 toneladas al año, lo que permite mejorar las propiedades del suelo en cuanto a sus contenidos de materia orgánica. La emisión de CO_2 por el cultivo de amaranto, es por la adición de la materia orgánica del suelo y la disponibilidad de humedad durante el año agrícola.

Es necesario evaluar el efecto de la adición del rastrojo del cultivo de amaranto en los suelos agrícolas de Cuapiaxtla, Tlaxcala, y el potencial de este cultivo para la captura de carbono.

BIBLIOGRAFÍA

Benedicto-Valdés G.S., Montoya-García C. O., Vicente-Hernández Z., Ramírez-Ayala C. & Escalante-Estrada J. A. S. (2019). Incorporación de abonos orgánicos y liberación de C-CO2 como indicador de la mineralización del carbono. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 6(18):513-522.

FAO. (2017). Voluntary guidelines for sustainable soil management. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2017. http://www.fao.org/3/a-bl813e.pdf.

Gabriel, M. L., Hernández H. B.R., Peña C. V., Torres L. N.G., Espinoza M. V.A. & Ramírez P. L. (2018). Usos actuales y potenciales del Amaranto (*Amaranthus* spp.). *JONNPR*. 3(6):423-436.

García-Pereyra J, Valdés-Lozano CGS, Olivares-Sáenz E., Alvarado-Gómez O., Alejandre-Iturbide G., Salazar-Sosa E. & Medrano-Roldan H. (2009). Rendimiento de grano y calidad del forraje de amaranto (*Amaranthus* spp.) cultivado a diferentes densidades en el noreste de México. FYTON. ISSN 0031 9457, 78: 53-60.

Lal, R. (2016.) Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*; 5(4):212–222.

Loomis, R.S. & Connors D.J. (2002). Ecología de cultivos, productividad y manejo en sistemas agrarios. Ed. MundiPrensa, Madrid España, 591p. ISBN 84-8476-080-4.

Malhi, GS, Kaur M, Kaushik P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: a review. *Sustainability.* 2021;13(3):1318.

Mapes-Sanchez C., Basurto-Peña F. & Bautista L. (2012). Manejo y Cultivo de *Amaranthus* spp. como Quelite en la Sierra Norte de Puebla, México. UNAM. 31p.

Monroy-Pedroza, D., Martinez-Hernandez, J de J., Gavi-Reyes F., Torres-Aquino, Margarita & Hernandez-Rios, I. 2021. Crecimiento, acumulación y distribución de materia seca en dos variedades de amaranto (*Amaranthus hypochondriacus* y *A. cruentus)* bajo irrigación. *Revista de ciencias biológicas y de la salud BioTecnia,* 23(3):14.21.

Ortiz-Cornejo N.L., Luna-Guido M., Rivera-Espinoza Y., Vásquez-Murrieta M.S., Ruíz-Valdiviezo V.M. & Dendooven L. (2015). Greenhouse gas emissions from a chinampa soil or floating gardensin Mexico. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 31 (4): 343-350.

Pulgarín-Ortega, H., Parral-Herrera, E., Cabañas-Martínez, O., & Bárcena-Gama, J. R. (2024). Rastrojo de amaranto (*Amaranthus* spp.) como fuente de forraje en la alimentación de corderos. *Agro-Divulgación, 4*(6). https://doi.org/10.54767/ad.v4i6.404.

Rahul Bhadouria, Rishikesh Singh, Vipin Kumar Singh, Anwesha Borthakur, Arif Ahamad, Gaurav Kumar and Pardeep Singh. 2019. Agriculture in the Era of Climate Change: Consequences and Effects. *Climate Change and Agricultural Ecosystems.* 1-23. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816483-9.00001-3.

Chen, S., Liu W., Parsons, D., Du, T. (2024). Optimized irrigation and fertilization can mitigate negative CO_2 impacts on seed yield and vigor of hybrid maize. *Science of the Total Environment,* 952(2024) 175951.

SEMARNAT. (2018). México Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México 751p.

VANADIO EN LOS ESPACIOS VERDES URBANOS DE MORELIA: EVALUACIÓN BASADA EN LOS SUELOS

Armando Navarrete Segueda[1]; María Lourdes González Arqueros[2]; Ruth Villanueva Estrada[3]

[1] Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, 58190, Morelia, Michoacán, México.
[2] SECIHTI-Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, 58030, Morelia, Michoacán.
[3] Instituto de Geofísica Unidad Michoacán Universidad Nacional Autónoma de México. 58190, Morelia, Michoacán, México.

Correo del autor de correspondencia: anavarrete@cieco.unam.mx

RESUMEN

El vanadio (V) es un metal traza cuya presencia en ambientes urbanos ha generado gran interés por su efecto toxicológico en órganos como pulmones, riñones e hígado. Su principal fuente antropogénica es la combustión de derivados del petróleo, lo que provoca su liberación atmosférica y posterior deposición en los suelos urbanos. Este estudio evaluó la concentración de V en suelos de cuatro tipos de espacios verdes en la ciudad de Morelia, Michoacán: parques urbanos, camellones, riberas de río y bosques periurbanos. Se analizaron propiedades fisicoquímicas de los suelos y se aplicaron análisis para comparar la concentración de V (ANOVA) y relacionar los patrones de acumulación del V en los suelos urbanos (PCA y regresiones lineales). Con excepción de los bosques periurbanos, en su mayoría, los suelos urbanos rebasaron el umbral establecido por la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2007. Los espacios verdes con mayor cercanía a vías de tráfico intenso, como los camellones, no registraron las concentraciones más altas de V. El análisis reveló que la concentración de V no se relaciona significativamente con el pH o la conductividad eléctrica, pero sí con la textura del suelo: a mayor contenido de arcilla, mayor concentración de V. Este patrón sugiere una mayor retención del metal en suelos de textura fina, mientras que en suelos arenosos su movilidad podría incrementar el riesgo de lixiviación hacia capas más profundas.

PALABRAS CLAVE: *Contaminación urbana; Metales pesados; Servicios ecosistémicos.*

INTRODUCCIÓN

El vanadio (V) es un elemento metálico cuya relevancia socioambiental ha cobrado creciente atención debido a su presencia en ambientes urbanos y su potencial impacto en la salud. La exposición a este elemento se ha asociado con efectos toxicológicos significativos, particularmente en los sistemas respiratorios, digestivo y excretor, con particular efecto en riñones e hígado (Guagliardi *et al.,* 2018). Una de las principales fuentes antropogénicas de V en entornos urbanos es la combustión de derivados del petróleo, en los cuales este elemento se encuentra en concentraciones elevadas. Su

liberación al ambiente ocurre a través de emisiones atmosféricas, contribuyendo a la contaminación de suelos por deposición seca y húmeda (Wnuk, 2023).

El análisis de los riesgos toxicológicos asociados a contaminantes como el V se encuentra fuertemente asociado con la magnitud de las emisiones, lo que sugiere que su concentración muestra una relación positiva con la proximidad a las fuentes de emisiones (Hernandez y Rodriguez, 2012). Una vez depositado en los suelos, la movilidad y disponibilidad del V se ven influenciadas por propiedades fisicoquímicas como el pH, la capacidad de intercambio catiónico, el contenido de arcillas y la concentración de materia orgánica (Wnuk, 2023). Sin embargo, el tipo de espacio verde urbano (por ejemplo, parques, camellones, entre otros) también debe ser considerado, ya que este enmarca el grado de interacción entre los habitantes y los suelos, modulando así el riesgo potencial asociado con la exposición a contaminantes (Joo *et al.,* 2024). En este contexto, el objetivo del presente estudio fue responder si existen diferencias en la concentración de V en suelos de espacios verdes urbanos diferenciados a partir de la tipología, y también se respondió si las propiedades fisicoquímicas de los suelos permiten inferir el riesgo de movilidad del V.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la evaluación de suelos en espacios verdes contrastantes, se analizaron suelos en i) parques urbanos, ii) camellones de vías primarias y iii) espacios verdes ubicados en la ribera de un río, el cual atraviesa la zona urbana de Morelia y delimita una de las avenidas principales de la ciudad. Finalmente, para establecer condiciones de referencia, se analizaron iv) espacios verdes en bosques periurbanos. En cada tipo de espacio verde se delimitaron seis transectos de 2 × 50 m. A lo largo de cada transecto se realizó el muestreo de suelo; se tomaron seis muestras con separación lineal de 10 m (0, 10, 20, 30, 40 y 50 m) a 30 cm de profundidad. Las seis submuestras recolectadas por transecto se homogeneizaron para formar una muestra compuesta por transecto. En cada punto de muestreo de suelo se tomaron tres muestras con un cilindro de 100 ml para determinar la densidad aparente. Para el análisis fisicoquímico de las muestras de suelo, se realizaron las pruebas en laboratorio a partir de la NOM-021 (SEMARNAT, 2002). La cuantificación de metales pesados en las muestras se realizó mediante espectrometría óptica de plasma inductivamente acoplado (ICP-OES, por sus siglas en inglés).

Se aplicaron análisis de varianza (ANOVA) y comparaciones múltiples de medias para identificar si existen diferencias en la concentración de V entre los tipos de espacio verde analizados. Se realizó un análisis de componentes principales para identificar si existen gradientes, de propiedades fisicoquímicas, que permitan asociar la concentración del V con los suelos urbanos de Morelia. Finalmente, se aplicaron modelos de regresión entre los ejes obtenidos del PCA (como predictores) y la concentración de V como variable de respuesta. Todos los análisis se realizaron previa comprobación de supuestos de normalidad y homocedasticidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 se muestra el análisis comparativo de las concentraciones de vanadio en los suelos de los cuatro tipos de espacios verdes urbanos y periurbanos analizados. Los suelos en los parques presentan concentraciones más elevadas de vanadio, seguidas de riberas de río y camellones. Los bosques periurbanos presentaron la menor concentración de este elemento. La línea punteada roja representa el valor umbral de referencia indicado por la NOM-147 (SEMARNAT/SSA, 2007) para uso agrícola o residencial. Con excepción de algunos camellones, los suelos urbanos rebasan este umbral. La mayor concentración de V en los parques contrasta con lo reportado por Zhu *et al.* (2025), quienes indican que las concentraciones de metales pesados en el suelo tienden a ser más elevadas en camellones que en parques urbanos. Esta diferencia se ha atribuido principalmente a la proximidad de los camellones a fuentes directas de emisión vehicular, lo que incrementa la deposición de los contaminantes. Al considerar lo registrado en los parques, este patrón no se observó en los suelos de la ciudad de Morelia, en adición al resultado anterior, tanto los camellones como las riberas del río presentan características morfológicas similares y están expuestos a niveles comparables de volumen de tráfico vehicular.

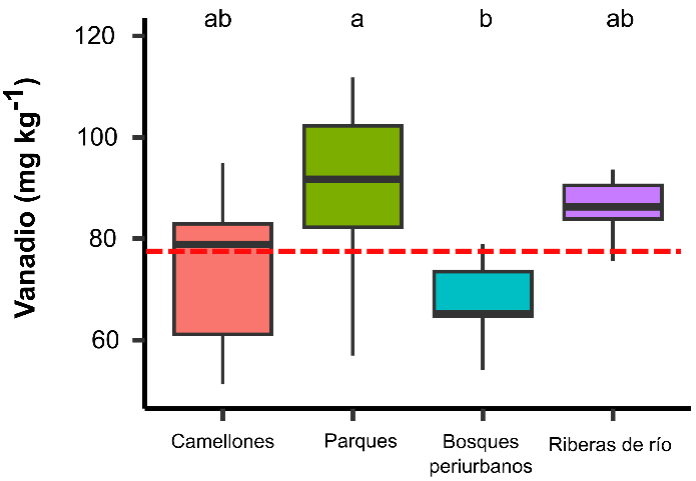


Figura 1. Concentración de vanadio en los suelos de los diferentes tipos de espacio verde de Morelia. Diferentes letras representan una diferencia significativa con un valor $P < 0.05$.

A partir del PCA, se identificaron dos gradientes en los suelos de Morelia. El primero de ellos (33.8% de la varianza) se asocia con la variación del pH, conductividad eléctrica y porcentaje de fragmentos gruesos. Este gradiente se presenta de forma recurrente en suelos urbanos (Cram *et al.*, 2008), y podría indicar el efecto de la adición de materiales de construcción, con los cuales puede ser asociada la formación de estos suelos (Jim, 1998). El segundo eje del PCA (25.7% de la varianza) muestra un gradiente asociado con la textura de los suelos, en particular, la proporción de arcillas y arenas. Esta variación indica posibles consecuencias en el régimen hídrico y la capacidad buffer de los suelos (Bünemann *et al.*, 2018).

En la Figura 2 se muestra la relación entre la concentración de V en el suelo (mg kg^{-1}) y los gradientes obtenidos del PCA. Los resultados muestran que no existe relación entre la variación de la concentración de V y el gradiente determinado por el eje 1 del PCA. Este resultado contrasta con Liu *et al*. (2022), quienes indican que el pH afecta la presencia, disponibilidad y movilidad de los metales pesados. Por el contrario, se observa un efecto significativo entre la variación de la textura y la concentración de V (R^2 = 0.37, P = 0.001). En la textura se aprecia que a medida que aumenta el contenido de arena en el suelo (y disminuye el de arcilla), la concentración de vanadio disminuye. Esto sugiere que el vanadio tiende a asociarse más con suelos de textura fina, posiblemente por su mayor capacidad de adsorción y retención de metales (Liu *et al*., 2022; Bünemann *et al*., 2018).

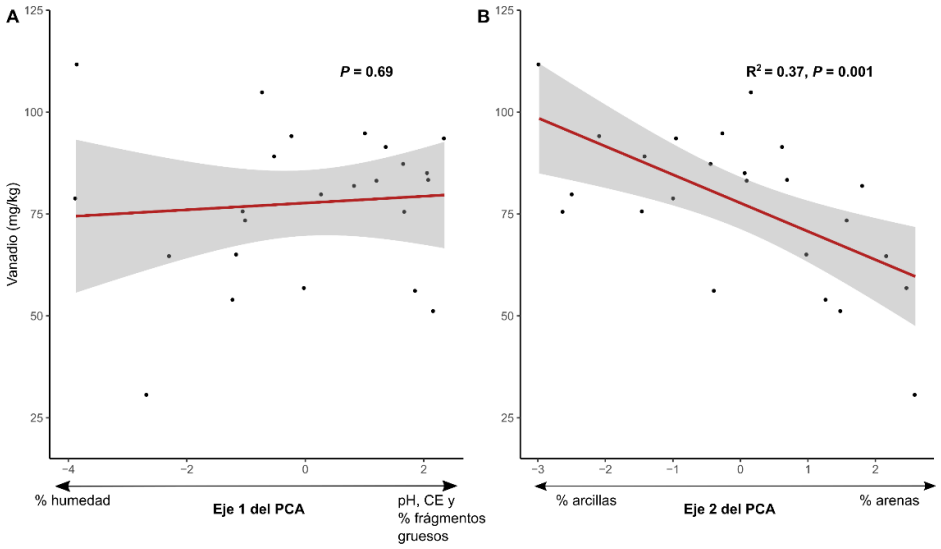


Figura 2. Relación entre la concentración de vanadio y los gradientes de los suelos en Morelia, representados por los ejes 1 y 2 del PCA (A y B respectivamente).

La concentración de V en los suelos con más contenido de arcilla (Figura 2a) podría indicar mayor movilidad de este elemento en los suelos de textura arenosa, razón por la cual los suelos de los camellones y de ribera de río podrían no estar reteniendo este metal. Como consecuencia, estos suelos podrían estar permitiendo la movilidad del V a puntos más profundos de la zona vadosa o, incluso, al acuífero. Debido a que los suelos analizados no difirieron en contenido de materia orgánica, el manejo de esta a partir de enmiendas orgánicas podría ser una práctica adecuada para incrementar la capacidad buffer de los suelos en camellones y riberas de río.

Los altos valores de V en los parques requieren estudios sobre la biodisponibilidad de este elemento, lo cual permitirá identificar prácticas específicas como fitorremediación o remediación de suelos (Rehman *et al*., 2023) para evitar riesgos para la población.

CONCLUSIONES

La concentración de vanadio excede los valores límite para zonas urbanas. Este elemento no se relaciona con propiedades como pH, humedad o CE, pero sí está

influenciado por la textura del suelo, específicamente con una mayor afinidad por suelos con alto contenido de arcilla, como los parques urbanos. Esta información es relevante para comprender la retención y movilidad potencial del vanadio en suelos urbanos, así como para identificar áreas de mayor riesgo de acumulación.

AGRADECIMIENTOS

Armando Navarrete-Segueda agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, por la beca posdoctoral otorgada a partir de la convocatoria 2022 (1) "Estancias Posdoctorales por México-Académica". Así mismo, al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la Universidad Nacional Autónoma de México, por el financiamiento otorgado a través del apoyo IN213922.

BIBLIOGRAFÍA

Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W. & Brussaard, L. (2018). Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, *120*, 105–125. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030.

Cram, S., Cotler, H., Morales, L. M., Sommer, I. & Carmona, E. (2008). Identificación de los servicios ambientales potenciales de los suelos en el paisaje urbano del Distrito Federal. *Investigaciones Geográficas*, *66*, 81–104. https://doi.org/https://doi.org/10.14350/rig.17983.

Guagliardi, I., Cicchella, D., De Rosa, R., Ricca, N. & Buttafuoco, G. (2018). Geochemical sources of vanadium in soils: Evidences in a southern Italy area. *Journal of Geochemical Exploration*, *184*, 358–364. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.11.017.

Hernandez, H. & Rodriguez, R. (2012). Geochemical evidence for the origin of vanadium in an urban environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, *184*(9), 5327–5342. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2343-9.

Jim, C. . (1998). Urban soil characteristics and limitations for landscape planting in Hong Kong. *Landscape and Urban Planning*, *40*(4), 235–249. https://doi.org/10.1016/S0169-2046(97)00117-5.

Joo, H. E., Clark, J. A. G., Kremer, P. & Aronson, M. F. J. (2024). Socio-environmental drivers of human-nature interactions in urban green spaces. *Urban Ecosystems*, *27*(6), 2397–2413. https://doi.org/10.1007/s11252-024-01593-3.

Liu, Z., Fei, Y., Shi, H., Mo, L. & Qi, J. (2022). Prediction of high-risk areas of soil heavy metal pollution with multiple factors on a large scale in industrial agglomeration areas. *Science of The Total Environment*, *808*, 151874. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151874.

Rehman, Z. ur, Junaid, M. F., Ijaz, N., Khalid, U. & Ijaz, Z. (2023). Remediation methods of heavy metal contaminated soils from environmental and geotechnical standpoints. *Science of The Total Environment*, *867*, 161468. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161468.

SEMARNAT/SSA. (2007). NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio.

Wnuk, E. (2023). Mobility, bioavailability, and toxicity of Vanadium regulated by physicochemical and biological properties of the soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *23*(1), 1386–1396. https://doi.org/10.1007/s42729-023-01130-9.

Zhu, R., Ren, Z., Parajuli, M., Yuan, Y., Yang, Q. & Yu, A. (2025). Assessment of potential ecological and health risk of potentially toxic elements in roadside green areas and urban parks. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *13*(1), 115045. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115045.

METALES PESADOS EN FLORES DESHIDRATADAS DE CEMPASÚCHIL CULTIVADAS EN ZONAS EXPUESTAS A CONTAMINANTES URBANOS E INDUSTRIALES

Reyna Yesenia Campos González[1]; Armando Quintero Ramos[2]; Oscar Cruz Álvarez[1]; Ofelia Adriana Hernández[1]; Dámaris Leopoldina Ojeda Barrios[1]

[1] Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, 31160, Chihuahua, México.
[2] Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Químicas, 31125, Chihuahua, México.

Correo del autor de correspondencia: dojeda@uach.mx

RESUMEN

El avance urbano e industrial ha reducido la extensión de suelo cultivable en las ciudades. Esto expone a las plantas a diversos contaminantes que pueden poner en riesgo la salud de los consumidores. El objetivo de este trabajo fue analizar metales pesados (As, Hg, Pb y Cd), de forma cualitativa y cuantitativa ($mg \cdot kg^{-1}$) en flores de cempasúchil secas (675 inflorescencias de 135 plantas), cultivadas en la ciudad de Chihuahua, expuestas a contaminantes urbanos e industriales por ICP-OES. Los resultados indican que no se detectaron As ni Hg, pero sí Pb y Cd. Las flores de la zona urbana-industrial tuvieron las concentraciones más altas de Pb (2.98 $mg \cdot kg^{-1}$) y Cd (1.36 $mg \cdot kg^{-1}$). El Pb en esta zona excedió hasta 149 veces el límite para un alimento infantil (Pb < 0.02 $mg \cdot kg^{-1}$) y el Cd 34 veces (Cd < 0.04 $mg \cdot kg^{-1}$), según la Unión Europea. En cuanto a su uso como condimento floral o harina de cereal, ninguna de las tres zonas se encontró dentro de los valores permitidos (Condimento: Pb < 1 $mg \cdot kg^{-1}$, Cereal: Pb < 0.2 $mg \cdot kg^{-1}$, Cd < 0.1 $mg \cdot kg^{-1}$). Las flores de la ribera y zona media están dentro de los valores aceptables para plantas medicinales secas (Pb < 5 y Cd < 1 mg kg^{-1}) y/o suplementos en polvo para adultos (Pb < 3 $mg \cdot kg^{-1}$, Cd < 1 $mg \cdot kg^{-1}$). Estos datos muestran la necesidad de profundizar en el impacto de los metales pesados, extender el análisis a otras plantas cultivadas en la ciudad, proponer soluciones y evaluar el potencial del cempasúchil como agente biorremediador.

PALABRAS CLAVE: *Biorremediación; contaminantes; flores comestibles; plantas medicinales; Tagetes erecta (L.).*

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de las ciudades y sus factores contaminantes como el tránsito vehicular, la quema de residuos y combustibles, los desechos industriales, etc., tienen consecuencias negativas para los suelos, ríos, aire, seres vivos, incluidos los seres humanos. La capital de Chihuahua es una ciudad industrial en la que aún se practica la agricultura y la ganadería. Aunado a la contaminación actual, también se ve afectada por un antiguo sitio de fundición de metales (Pb, Ag, Au, Cd y Zn), llamado Ávalos, que cesó de operar

en 1997 y dejó toneladas de metales pesados apilados al aire libre, próximos a zonas pobladas y agrícolas (Montes *et al.,* 2025).

Generalmente, se considera que la ingesta de plantas alimentarias y medicinales es segura, por ser naturales. Sin embargo, es necesario analizar el contenido de metales pesados como As, Hg, Pb y Cd, que encabezan la lista de los metales pesados más peligrosos del mundo en los alimentos. Aún en pequeñas concentraciones, se acumulan en el organismo y no pueden metabolizarse, lo que causa toxicidad, producen especies reactivas del oxígeno (ROS), inhiben enzimas, afectan al sistema inmunitario, al sistema nervioso, así como a diversos órganos. También provocan retraso del crecimiento, demencia, apoptosis celular, interfieren con los ácidos nucleicos y pueden provocar cáncer o la muerte (Ohiagu *et al.,* 2022). Algunos estudios previos han demostrado la presencia de metales pesados como As, Pb, Cd y Hg en suelo, agua, plantas, peces, incluso en sangre de niños en la ciudad de Chihuahua (Nevárez *et al.,* 2015; Ponce *et al.,* 2025; Sipse, 2015; Tarango, 2005). En un análisis de diversas muestras de suelo de la ciudad de Chihuahua, la concentración más alta de metales pesados fue el de la zona industrial (Alcalá *et al.,* 2009) En cuanto a alimentos de origen vegetal y su relación con el río como fuente de contaminación, Tarango (2005) encontró concentraciones elevadas de Pb (11.05 ppm) y Cd (0.15 ppm), en la almendra de nogal cuyas plantas fueron fertilizados con biosólidos procedentes de una planta depuradora de aguas residuales de la ciudad de Chihuahua.

La flor de cempasúchil (*Tagetes erecta* L.) una de las más ampliamente consumidas en el mundo como alimento, se cultiva en la ciudad de Chihuahua como planta ornamental y crece sin verse aparentemente afectada por las condiciones áridas, plagas, enfermedades y contaminantes ambientales. Tiene gran potencial como flor comestible, ya que es muy atractiva, aromática, medicinal y posee diversos compuestos bioactivos, como han demostrado estudios científicos (Kar y Patra, 2024; López *et al.,* 2024). Además, la planta es muy adaptable y resistente a diversas condiciones adversas y extremas como sucede en Chihuahua y se ha usado incluso como agente biorremediador (Madanan *et al.,* 2021).

En ese sentido, el objetivo del presente trabajo fue analizar de forma cualitativa y cuantitativa la concentración de metales pesados presentes en flores deshidratadas de cempasúchil expuestas a contaminantes urbanos e industriales, cultivadas en una zona agrícola dentro de la ciudad de Chihuahua con vistas a su posible uso como flor comestible o agente de biorremediación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio experimental de 0.48 ha de extensión, se encuentra a 1385 m s.n.m. en un área semiurbana de la ciudad de Chihuahua, con alta probabilidad de que los suelos estén contaminados debido a la cercanía que presenta con un lecho de río, una avenida principal, zonas residenciales de alta densidad, una fábrica de aluminio y la antigua fundidora de metales "Ávalos ", situada a 4 km.

El material vegetal consistió en plantas de cempasúchil cv. 'Chedi Orange', caracterizadas por múltiples y grandes flores (10-12 cm) de color naranja. El terreno de cultivo se dividió en tres secciones verticales: (R= ribera; M=intermedio; y U-I= urbano-industrial) y tres secciones horizontales, con la finalidad de mejorar el análisis del efecto en la concentración de metales pesados, en un diseño experimental de bloques completos al azar.El muestreo aleatorio por sección del terreno se realizó a finales de octubre de 2024, donde la unidad de muestreo consistió en 15 plantas con flores, de las cuales se tomaron al azar 75 capítulos florales completamente abiertos y desarrollados. Las muestras se colocaron en bolsas con cierre hermético y almacenadas en hieleras de poliestireno expandido. Las flores fueron lavadas con agua destilada y se colocaron en papel secante para su deshidratación a temperatura ambiente para evitar la pérdida de arsénico (As) por volatilización. La temperatura media fue de 22.65°C con un intervalo de 13.7 a 31.6 ° C. El material vegetal seco se trituró para formar muestras compuestas.

Las plantas se digerieron en un microondas Mars 6 por el método EPA 3052. Las muestras líquidas se inyectaron en el sistema para su análisis a través de espectrometría de emisión óptica de plasma inductivamente acoplado (ICP-OES) en un equipo Thermo Scientific modelo iCAP 6500 previamente calibrado. Los metales pesados objetivo fueron mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As) y cadmio (Cd). Se excluyeron el hierro (Fe), cromo (Cr), cobre (Cu) y zinc (Zn), etc., al ser nutrientes minerales esenciales. Los resultados se expresan como mg kg^{-1} de peso seco (ps). Los datos fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) y una separación múltiple de medias mediante Tukey, para lo que se empleó el paquete de análisis estadístico INFOSTAT 2020.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis cualitativo. No se detectaron As ni Hg en las flores de cempasúchil, solo se encontraron Pb y Cd. Estos resultados son similares a los reportados por Tarango (2005), quien no encontró As ni Hg en la almendra de nuez pecanera, pero sí Pb y Cd.

Análisis cuantitativo por zona. Las flores de la sección ubicada en torno a la zona urbana-industrial presentaron la concentración más alta de Pb y Cd seguida de la ribera (Cuadro 1). Esto coincide con estudios previos en la ciudad de Chihuahua, donde el suelo de la zona industrial fue el que presentó mayor concentración de Pb y otros metales pesados (Alcalá *et al.,* 2009). De acuerdo con el agricultor, años atrás, la sección de su terreno denominada urbano-industrial fue rellenada con suelo proveniente de una empresa que procesa metales y actualmente riega con agua de río, la cual, según Tarango (2005), lleva una carga considerable de metales pesados. A diferencia de los resultados obtenidos por Tarango (2005), la concentración de Pb en la almendra de nogal pecanero (11.05 ppm) fue superior a la encontrada en la flor de cempasúchil. Por otra parte, la concentración de Cd en la almendra de nuez pecanera (0.15 ppm), fue inferior a la encontrada en las flores de cempasúchil.

Cuadro 1. Concentraciones de plomo y cadmio en flores de cempasúchil cultivadas en zonas contaminadas por metales pesados en Chihuahua, México

Sección	Pb (mg·kg^{-1})	Cd (mg·kg^{-1})
R	2.07 ± 0.0009 b	0.88 ± 0.0010 b
M	1.99 ± 0.0057 c	0.72 ± 0.0015 c
U-I	2.98 ± 0.0057 a	1.36 ± 0.0011 a

R= ribera, M=intermedio, U-I=urbano-industrial. Los valores representan la media de tres repeticiones. Los datos son expresados en peso seco, ± es el error estándar de la media. Letras diferentes (a, b, c) indican diferencias significativas, Tukey ($p<0.05$).

Comparación de los niveles de Pb y Cd con los límites permitidos. Actualmente, no existen normas que indiquen niveles específicos de metales pesados en flores de cempasúchil. Por ello, los límites de Pb y Cd se compararon con los valores de la Unión Europea (UE) para productos deshidratados de consumo similar. Esta concentración máxima permitida es como sigue: planta medicinal < 5 mg kg^{-1} Pb y < 1 mg kg^{-1} Cd; suplemento en polvo < 3 mg kg^{-1} Pb y < 1mg kg^{-1} Cd; Condimento floral tipo azafrán < 1 mg kg^{-1} Pb, no hay valor para Cd; Cereal < 0.2 mg kg^{-1} Pb y < 0.1 mg kg^{-1} Cd; Alimento infantil < 0.02 mg kg^{-1} Pb y < 0.04 mg kg^{-1} Cd (Reglamento (UE) 2023/915, 2023).

Conforme a estos valores de referencia, en su uso como planta medicinal y suplemento en polvo, la concentración de Pb en las flores deshidratadas de la ribera, la zona media y la sección urbana-industrial se encuentra dentro de los límites permitidos. En cuanto al Cd, solo las flores de la ribera y zona media se encuentran por debajo del límite, mas no las flores de la sección urbana-industrial. Con respecto a su posible aplicación como condimento floral, harina de cereal o alimento para niños menores de seis años, las tres zonas de muestreo excedieron los límites máximos permitidos; sobre todo como alimento infantil donde supera desde 99 hasta 149 veces lo permitido para Pb y de 18 hasta 34 veces para Cd (Cuadro 2).

Cuadro 2. Exceso relativo de plomo y cadmio respecto a los valores máximos permitidos en alimentos

Metal pesado	Sección	Planta medicinal seca	Suplemento en polvo	Condimento floral	Cereal	AEPN < 6 años
Pb	R	0.41	0.69	2.07	10.36	103.60
	M	0.40	0.66	1.99	9.93	99.33
	U-I	0.60	0.99	2.98	14.92	149.17
Cd	R	0.88	0.88	-	8.80	22.00
	M	0.72	0.72	-	7.22	18.06
	U-I	1.36	1.36	-	13.64	34.11

R= ribera, M=intermedio, U-I=urbano-industrial. AEPN <6 años= Alimento en polvo para niños menores de 6 años. Los valores representan el cociente entre la concentración encontrada en las flores de cempasúchil y el límite máximo permitido. Valores > 1 indican exceso respecto a las regulaciones internacionales. Valores < 1 indican que la concentración se encuentra dentro de los límites permitidos para esa forma de alimento. La Unión Europea no establece límites máximos para Cd en un condimento floral (-).

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra la presencia de Pb y Cd en flores de cempasúchil cultivadas en un campo aledaño a un lecho de río, así como en zonas urbanas e industriales que actúan como fuente de contaminación. Aunque no existen límites específicos para metales pesados en flores de cempasúchil, tomando como referencia alimentos de consumo similares en su forma deshidratada, se concluye que, en las condiciones actuales, su uso como alimento en polvo para niños menores de 6 años y como harina o condimento para adultos, debe evitarse. Sin embargo, según los estrictos estatutos de la Unión Europea, actualmente se podrían usar las flores de algunas zonas de cultivo con fines medicinales para preparar tés y/o suplementos para adultos, ya que las concentraciones de Pb y Cd para estos propósitos se encuentran dentro de los valores permitidos.

Es necesario profundizar en el estudio, sobre todo después de aplicar soluciones que beneficien a agricultores y a los consumidores. Por otra parte, la presencia de metales pesados en la flor abre la posibilidad de estudiar su uso en la remediación de zonas contaminadas de la ciudad.

BIBLIOGRAFÍA

Alcalá, J., Sosa, M., Moreno, M., Rodríguez, J. C., Quintana, C., Terrazas, C. & Rivero, O. (2009). Metales pesados en suelo urbano como un indicador de la calidad ambiental: Ciudad de Chihuahua, México. Multequina, 18(2), 53–69. http://www.scielo.org.ar/pdf/multeq/v18n2/v18n2a01.pdf.

Kar, S. & Patra, S. (2024). A Review on Marigold (Tagetes erecta Linn): The Phytochemicals Present and its Biological activities. Rasayan Journal of Chemistry, 6(4), 50–58. https://doi.org/10.53023/p.rasayan-20221220.

López, D., Chang, W.-T. & Heinrich, M. (2024). From "traditional" to modern medicine: A medical and historical analysis of Tagetes erecta L. (Cempasúchil). J*ournal of Traditional and Complementary Medicine*.

Madanan, M. T., Shah, I. K., Varghese, G. K., & Kaushal, R. K. (2021). Application of Aztec Marigold (Tagetes erecta L.) for phytoremediation of heavy metal polluted lateritic soil. E*nvironmental Chemistry and Ecotoxicology,* 3, 17–22.

Montes, G., Muñoz, Z. Y., Cortes, L., Carrillo, J., Ramírez, O., Ortiz, I., Muñoz, L. N. & González, R. (2025). Microbial Diversity and Heavy Metal Resistome in Slag-Contaminated Soils from an Abandoned Smelter in Chihuahua, Mexico. *Soil systems,* 9(2), 30. https://doi.org/10.3390/soilsystems9020030.

Nevárez, M., Leal, L. O., & Moreno, M. (2015). Estimation of Seasonal Risk Caused by the Intake of Lead, Mercury and Cadmium through Freshwater Fish Consumption from Urban Water Reservoirs in Arid Areas of Northern Mexico. *International Journal of Environmental Research and Public Health,* 12(2), 1803–1816. https://doi.org/10.3390/ijerph120201803.

Ohiagu, F. O., Chikezie, P. C., Ahaneku, C. C., & Chikezie, C. M. (2022). Human exposure to heavy metals: Toxicity mechanisms and health implications. *Material Science & Engineering International Journal,* 6(2), 78–87.

Ponce, A., Carranza, C., Ceballos, J. G., Rubio, J. A., & Martínez, D. (2025). Overview of the heavy metal contamination in Mexico: Sources of the contamination and issues in human health. *Environmental Geochemistry and Health*, 47(3), 82. https://doi.org/10.1007/s10653-025-02390-3.

Reglamento (UE) 2023/915 de la Comisión, de 25 de abril de 2023, relativo a niveles máximos de ciertos contaminantes en los alimentos y por el que se deroga el Reglamento (CE) n.º 1881/2006, Diario Oficial de la Unión Europea 103 (2023). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32023R0915.

Sipse, R. (2015, enero 16). Más de 100 niños intoxicados con plomo de Chihuahua. sipse.com. https://sipse.com/mexico/intoxicacion-plomo-chihuahua-casos-denuncia-132747.html

Tarango, G. (2005). Evaluación y determinación de metales pesados en nogales pecaneros (Carya illinoensis), abonados con biosólido. [Tesis de Maestría Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.].

DINÁMICA DEL CARBONO EDÁFICO ANTE EL CAMBIO DE USO DE SUELO EN TLALPUJAHUA, MICHOACÁN, MÉXICO

Erika Berenice Teteltitla Sánchez[1]; Noé Manuel Montaño[2]; Susana Adriana Montaño Arias[2]; Sara Lucía Camargo Ricalde[2]; Angélica Martínez Bernal[2]; Jenny Flores Medina[3]

[1] Maestría en Biología, [2] Departamento de Biología, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa. Av. Ferrocarril de San Rafael Atlixco 186, Leyes de Reforma 1ª Sección, Iztapalapa, 09310, CDMX, México.
[3] Coordinación General de Conservación y Restauración, Comisión Nacional Forestal. Periférico Poniente, 5360, San Juan de Ocotán, Zapopan, 45019, Jalisco, México.

Correo del autor de correspondencia: teteltitla280989@gmail.com

RESUMEN

El cambio de uso de suelo y la temporalidad de la lluvia regulan la capacidad de los bosques templados como sumideros o fuente de carbono (C) a la atmósfera. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la conversión de un bosque de pino-encino a una zona agrícola sobre la dinámica del C edáfico, a dos profundidades de suelo, durante las temporadas de lluvias y secas, en Tlalpujahua, Michoacán, México. En cinco parcelas de bosque y cinco de cultivo, se recolectaron muestras compuestas de suelo a 0-15 cm y 15-30 cm de profundidad, en lluvias (2021) y secas (2024). Se determinó la concentración de C y la densidad aparente para estimar el contenido de C; asimismo, se cuantificó la mineralización del C y del C microbiano por respiración/fumigación-incubación, y se estimó el coeficiente metabólico. Los resultados se evaluaron en un ANOVA seguido de pruebas de Tukey ($p < 0.05$). El suelo agrícola mostró mayor compactación en lluvias, el contenido de C fue mayor en el suelo del bosque de 0-15 cm en lluvias, la mineralización y el C microbiano fueron mayores en lluvias que en secas; mientras que el coeficiente metabólico indicó deficiencia metabólica como respuesta al estrés hídrico en el suelo del bosque durante secas y en el suelo de cultivo durante lluvias, debido a un menor contenido de C. Se concluye que el cambio de bosque a una zona agrícola altera la densidad aparente del suelo y favorece la pérdida del C edáfico.

PALABRAS CLAVE: *agricultura; almacén de C; bosque templado; materia orgánica; mineralización*

INTRODUCCIÓN

El cambio de uso de suelo (CUS) para la introducción de zonas agrícolas promueve el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Béjar *et al*., 2020). Entre estas, las comunidades microbianas y procesos biogeoquímicos ligados a la descomposición de la materia orgánica (MO) y, por tanto, la fertilidad del suelo (Kumar *et al*., 2023). El CUS disminuye la entrada de MO y modifica la estructura del suelo, alterando los procesos que determinan el almacén del C edáfico, lo que, a largo plazo, disminuye la fertilidad y salud de los ecosistemas (Cantú y Yáñez, 2017).

En México, los bosques templados son considerados sumideros de C; sin embargo, a causa de la expansión agrícola, estos presentan altas tasas de deforestación (Béjar *et al*., 2020). Los cambios en sus reservas de C están controlados por el equilibrio entre los aportes de MO desde la biomasa vegetal y la pérdida de C por respiración heterotrófica (Beillouin *et al*., 2021). El suelo es crucial en el ciclo del C, ya que puede actuar como fuente o sumidero de C a la atmósfera.

En el primer metro de profundidad, el suelo almacena alrededor de 1,500 Pg de C, los cuales se concentran principalmente en los primeros 30 cm que son los más vulnerables al CUS (Galicia *et al*., 2016). Esta capacidad edáfica para almacenar o liberar C es afectada por factores como la vegetación, temporalidad, actividad microbiana y el CUS (Galicia *et al*., 2016; Leul *et al*., 2023).

El aporte de C orgánico al suelo brinda energía para la actividad heterotrófica; una baja disponibilidad de C podría reducir la biomasa microbiana y afectar la fertilidad (Montaño *et al*., 2007). Por lo anterior, examinar la dinámica del C es fundamental en suelos forestales templados que han sido transformados, como ocurre en los suelos en Tlalpujahua, Michoacán, México, los cuales presentan problemas de degradación por la expansión de la agricultura (Béjar *et al*., 2020).

La hipótesis planteada fue que el CUS del bosque templado a cultivos, afecta la entrada de MO y la compactación del suelo, por lo que se esperaría un menor contenido de C en el suelo de la zona agrícola, en respuesta a dinámicas menos eficientes en el uso microbiano del C que en el suelo del bosque, y que estas diferencias, serían mayores en los 0-15 cm, y en temporada de lluvias, que a 15-30 cm de profundidad y en temporada seca.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la conversión del bosque de pino-encino a una zona agrícola (cultivo de maíz), sobre la dinámica del C edáfico, a dos profundidades del suelo, en las temporadas de lluvias y secas, en Tlalpujahua.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó en Cerro Alto, Tlalpujahua, Michoacán. El clima es templado húmedo, con temperatura entre 10 y 18 °C y precipitación anual entre 800 y 1,100 mm. El suelo es un Luvisol, con vegetación de pino-encino; un 44.8% del suelo en la zona ha sido utilizado para actividades agrícolas. El suelo se recolectó de 0-15 cm y de 15-30 cm de profundidad, en cinco parcelas de uso agrícola y cinco de bosque, durante la temporada de lluvias (agosto de 2021) y la temporada seca (abril de 2024). En las parcelas (50×50 m), la muestra fue recolectada con una barrena de 2.5 cm de diámetro. Se evaluaron: la densidad aparente (DA) por el método del cilindro metálico, la concentración de C por el método Dumas mediante Autoanalizador de CHN, el contenido de C (multiplicando la DA, profundidad y pedregosidad), la mineralización potencial de C por el método Isemeyer, mediante respiración-incubación y titulación con HCl, el C microbiano mediante fumigación-incubación con $CHCl_3$ y el coeficiente metabólico que se calculó dividiendo el CO_2 entre el C microbiano.

Los datos fueron sometidos a prueba de normalidad (Prueba Shapiro-Wilk) y homocedasticidad (Prueba Levene), así como a un análisis de varianza (ANOVA) en el programa NCSS, considerando: el uso de suelo, la profundidad de la toma de la muestra y la temporada de muestreo, seguido de pruebas de Tukey ($p < 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La DA del suelo osciló entre 0.45 y 0.75 g cm^{-3}, y difirió entre usos de suelo (*U:* $p < 0.001$) y temporadas (*T:* $p < 0.001$). El suelo de uso agrícola, en lluvias, tuvo mayor DA (0-15 cm=0.75 g cm^{-3}; 15-30 cm=0.67 g cm^{-3}), posiblemente debido a una menor cantidad de materia orgánica del suelo (MOS) y al manejo mecánico. De igual manera, Leul *et al*. (2023) reportaron que la DA aumentó un 20.9% en los primeros 20 cm de profundidad del suelo con la transformación de bosques a zonas agrícolas en Etiopía, asociada al uso de maquinaria pesada. En México, Béjar *et al*. (2021) mostraron que la DA del suelo, en un bosque de pino-encino, fue menor que en cultivos de aguacate, atribuyéndolo al manejo del suelo. García *et al*. (2006) también registraron menor DA en suelos de un bosque tropical seco, en comparación con suelos transformados a pastizales. La concentración de C registró diferencias entre el uso de suelo y la profundidad (U×P*:* $p < 0.001$).

El CUS disminuyó la concentración tanto de 0-15 cm (bosque: 7%; cultivo: 3%) como de 15-30 cm (bosque: 4%; cultivo: 3%), en ambas temporadas, lo que indicó una reducción de hasta el 59% en los primeros cm de profundidad. Asimismo, Leul *et al*. (2023) registraron pérdidas de C edáfico del 50% en bosques tropicales secos de México, transformados en zonas agrícolas. La disminución del contenido de C está asociada a una menor entrada de compuestos orgánicos que provienen del mantillo del suelo que, a su vez, provoca una menor lixiviación de formas solubles de C (Galicia *et al*., 2016).

En este estudio, el contenido de C fue afectado por el uso de suelo (*U:* $p < 0.001$) y la profundidad (*P:* $p < 0.01$), como lo reportan Leul *et al*. (2023) al señalar que el CUS puede influir negativamente en las reservas de C edáfico. En este caso, el contenido de C fue mayor en el suelo del bosque, principalmente, de 0-15 cm, tanto en lluvias (bosque: 60.5 t ha^{-1}; cultivo; 31.7 t ha^{-1}) como en secas (bosque: 42.8 t ha^{-1}; cultivo: 29.7 t ha^{-1}). De 15-30 cm, también, se registró una ligera disminución en el contenido de C edáfico en lluvias (bosque: 31.7 t ha^{-1}; cultivo: 24 t ha^{-1}) y secas (bosque: 31.2 t ha^{-1}; cultivo: 28.6 t ha^{-1}); aunque no se observaron diferencias entre temporadas (Figura 1).

El contenido de C edáfico registrado en Cerro Alto fue bajo; siendo congruente con Galicia *et al*. (2016), quienes registraron, para bosques de pino-encino en Michoacán, 103 t ha^{-1}; mientras que, en suelos modificados, 13 t ha^{-1}; sin embargo, los datos corresponden a Andosoles, por lo que es relevante considerar que el contenido de C en los suelos, igualmente, depende de su formación pedogenética. De la misma manera, Vela *et al*. (2011), también, reportaron un mayor contenido de C edáfico (> 150 Mg ha^{-1}) en bosques que, en cultivos, asociándolo a una baja cobertura vegetal, y a labores de siembra y cosecha que disminuyen las entradas de MO que desprotegen al suelo.

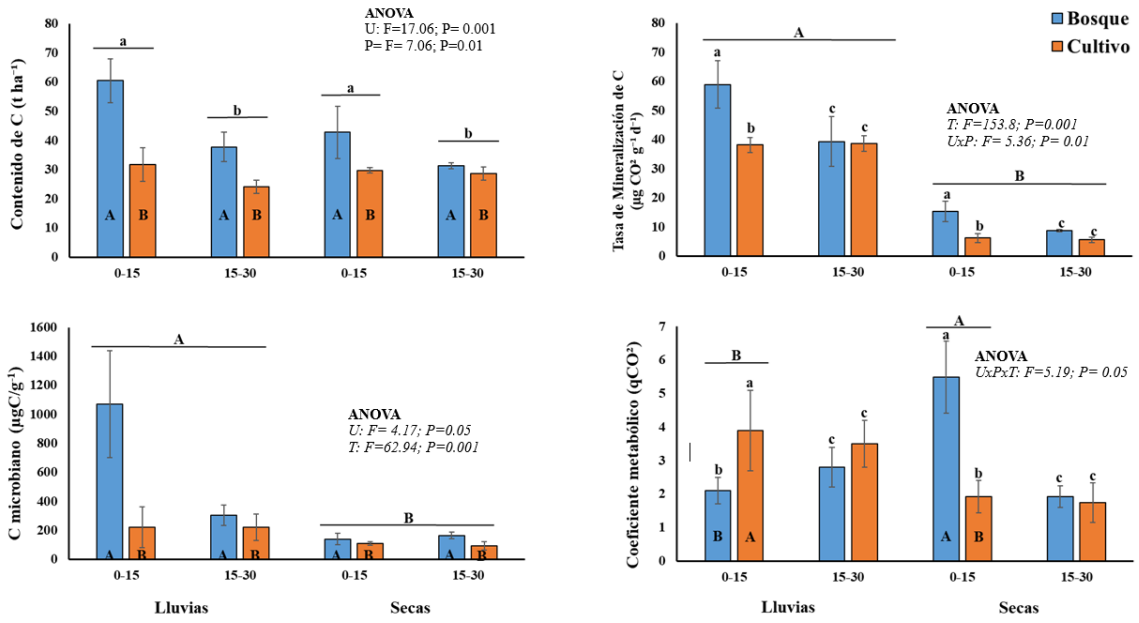


Figura 1. Variación en la dinámica del carbono del suelo de un bosque templado y terrenos agrícolas en dos profundidades (0-15 cm y 15-30 cm) durante las temporadas de lluvias y secas en Tlalpujahua, Michoacán, México.

Letras mayúsculas dentro de las barras reflejan diferencias estadísticas significativas entre los usos de suelo; letras mayúsculas sobre grupos de barras muestran diferencias significativas entre temporadas, y las letras minúsculas sobre las barras muestran diferencias significativas entre las profundidades de suelo.

El C orgánico proporciona los recursos para la actividad metabólica microbiana (Montaño *et al*., 2007), como la mineralización del C, la cual difiere entre los usos de suelo, en función de la profundidad (*U×P: p < 0.01*), y entre temporadas (*T: p < 0.001*). La mineralización de C fue mayor en el suelo del bosque solo de 0-15 cm de profundidad, sobre todo en lluvias (bosque: 58.9 µg CO_2 g^{-1} d^{-1} vs. cultivo: 38.19 µg CO_2 g^{-1} d^{-1}), y disminuyó en secas (bosque: 15.4 µg CO_2 g^{-1} d^{-1} vs. cultivo: 6.2 µg CO_2 g^{-1} d^{-1}). Algo similar fue reportado por García *et al*. (2006), quienes documentaron que la mineralización del C en el suelo fue mayor en bosques que en pastizales, en temporadas de lluvias y secas, en Jalisco, como respuesta a una mayor entrada de MO y cantidad de C lábil en el suelo.

La mineralización se encuentra controlada, además de por la cantidad de MO, por la temporalidad de la lluvia y las pérdidas por respiración. Beillouin *et al*. (2021), indicaron que la mineralización de C fue menor en suelos bajo cultivo, lo cual podría asociarse a bajos niveles de MO y al aumento en la DA del suelo que, a su vez, podría estar afectando la aireación y la humedad, creando un ambiente hostil para las comunidades microbianas. Asimismo, el CUS promueve la pérdida de C orgánico edáfico (Leul *et al*., 2023), incluido el C en la biomasa microbiana que representa hasta el 3% de la MO del suelo (Kumar *et al*., 2023). Esto se observó en el C microbiano edáfico, el cual varió con el uso del suelo (*U: p < 0.05*), ya que fue mayor en el bosque, principalmente, en lluvias en

los 0-15 cm (1070.7 µg C g^{-1}); mientras que, en el cultivo, de 0-15 cm, en lluvias, fue de 221.6 µg C g^{-1}, sugiriendo una reducción del 80%. Entre temporadas se observó que, en lluvias el C microbiano fue mayor (*T: p < 0.001*), en especial en el bosque a 0-15 cm de profundidad (lluvias: 1070.7 µg C g^{-1}; secas: 139.7 µg C g^{-1}); mientras que, en la zona agrícola los valores fueron menores (lluvias: 221.6 µg C g^{-1}; secas: 109.8 µg C g^{-1}). Kumar *et al*. (2023), reportaron un decremento del 38% en el C microbiano en suelos transformados a cultivos en la India, en comparación con bosques templados y coinciden en que estos bosques almacenan, en los primeros centímetros del suelo, la mayor proporción de C microbiano con 1063.5 µg C g^{-1}, seguidos de los sistemas agrícolas tradicionales (594.3 µg C g^{-1}).

El coeficiente metabólico (q-CO_2) mostró una interacción entre el uso de suelo, la profundidad y la temporada (*U×P×T: p < 0.05*), donde el suelo del bosque, de 0-15 cm en secas, registró mayor coeficiente metabólico (5.49 q-CO_2) que el suelo del cultivo de 0-15 cm en lluvias (3.5 q-CO_2). El q-CO_2 es considerado un indicador que refleja situaciones de estrés ambiental y la eficiencia en el uso del C; valores elevados indican una menor eficiencia metabólica; por ejemplo, en el bosque en temporada seca, podría deberse a condiciones de estrés hídrico, lo que refleja un mayor uso de energía de mantenimiento, debido a una baja disponibilidad de nutrientes en el suelo (Pérez *et al*., 2023); mientras que, en el suelo de zonas agrícolas en secas, se podría relacionar con la disminución en el contenido de C en el suelo, debido a una menor entrada de MO.

CONCLUSIONES

El CUS en Tlalpujahua provocó una reducción de hasta un 48% en el contenido de C en el suelo, lo cual se asoció con una disminución de hasta un 80% en el C microbiano. Asimismo, la temporalidad afecta la mineralización del C edáfico, en donde la temporada de lluvia brinda mejores condiciones para la actividad microbiana, ligadas al secuestro y almacenamiento de C. Por lo tanto, los resultados obtenidos confirman la hipótesis planteada, que el CUS de bosque templado a suelos agrícolas disminuyó la entrada de MO al suelo, aumentó su DA y modificó su capacidad para almacenar C.

BIBLIOGRAFÍA

Beillouin, D., Cardinael, R., Berre, D., Boyer, A., Corbeels, M., Fallot, A., Feder, F. & Demenois, J. (2021). A global overview of studies about land management, land use change, and climate change effects on soil organic carbon. *Global Change Biology,* 28: 1690-1702. https://doi.org. 10.1111/gcb.15998.

Béjar, S., Cantú-Silva, I., González-Rodriguez, H., Marmolejo-Moncivais, J., Yáñez-Díaz, M. & Luna-Robles, E. (2020). Effect of land use change and agricultural management on physical and hydrological properties of an Andosol in Uruapan, Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente,* 27: 323-335. http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.04.032.

Cantú, I. & Yáñez, M. (2017). Efecto del cambio de uso de suelo en el contenido de carbono orgánico y nitrógeno del suelo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales,* 9: 122-151. https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i45.138.

Galicia, L., Gamboa, A. Cram, S. Chávez, B. Peña, V., Saynes, V, & Siebe, C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra Latinoamericana,* 34: 1-29.

García, F., Gallardo, J., Montaño, N. & Islas, P. (2006). Soil carbon and nitrogen dynamics followed by a forest-to-pasture conversion in western Mexico. *Agroforestry Systems,* 66: 93-100. https://doi.org/10.1007/s10457-005-2917-z.

Kumar, A., Deo, R. & Kumar, S. (2023). Influence of land use on soil microbial communities of sub-Himalayas of India: insights from phospholipid fatty acid profiles, ribosomal intergenic spacer profiles, soil enzymes, and carbon pools. *Agroforest System*, 97: 1571-1585. https://doi.org/10.1007/s10457-023-00879-3.

Leul, Y., Assen, M., Damen, S. & Legass, A. (2023). Effects of land-use dynamics on soil organic carbon and total nitrogen stock, western Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science,* 2: 1-12. https://doi.org/10.1155/2023/5080313.

Montaño, N.M., García, F. & Jaramillo, V. (2007). Dissolved organic carbon affects soil microbial activity and nitrogen dynamics in a Mexican tropical deciduous forest. *Plant and Soil,* 295: 265-267. https://doi.org 10.1007/s11104-007-9281-x.

Pérez, C., Landínez, A. & Silva, A. (2023). Carbono orgánico y su dinámica en suelos tropicales: una revisión. *Cultura Científica,* 21: 1-22. https://doi.org/10.38017/1657463X.820.

Vela, G., López, J. & Rodríguez, M. (2011). Niveles de carbono orgánico total en el suelo de conservación del Distrito Federal, Centro de México. *Investigaciones Geográficas,* 77: 18-30.

EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA RESPIRACIÓN DEL SUELO: UN ESTUDIO DE SENSIBILIDAD

Leticia Citlaly López Teloxa[1]; Alejandro Ismael Monterroso Rivas[2]

[1] División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México. C.P. 56230.
[2] Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México. C.P. 56230.

Correo del autor de correspondencia: al2300036p@chapingo.mx

RESUMEN

La respiración del suelo es un proceso clave del ciclo del carbono, influenciado por factores bióticos, abióticos y prácticas de manejo. Este estudio analizó la variación espacial y temporal de la Rs en 12 sistemas de uso de suelo y modeló su sensibilidad ante distintos escenarios climáticos y de manejo. Se realizaron mediciones cada 30 minutos durante 24 horas en tres temporadas del año, empleando una cámara LICOR 8100. Además, se cuantificó el carbono orgánico del suelo (COS) y se registraron variables ambientales. Los resultados muestran mayores tasas de Rs en sistemas agropecuarios (hasta 1.78 g CO_2 m^{-2} h^{-1}) y menores en suelos desnudos o invernaderos. Se observó que el COS es mayor en sistemas forestales, con valores entre 32.5 y 211.0 t C ha^{-1}. Un modelo de regresión explicó el 33% de la variación de Rs, identificando la temperatura del suelo y la humedad como variables clave. El análisis de sensibilidad mostró que el cambio de cobertura y el aumento de temperatura pueden elevar significativamente las emisiones de CO_2, mientras que el aumento de cobertura puede mitigarlas. Se concluye que la conversión de sistemas agrícolas a agroforestales podría aportar co-beneficios en mitigación y adaptación al cambio climático, al reducir emisiones y aumentar el almacenamiento de carbono.

PALABRAS CLAVE: A*daptación; carbono orgánico de suelo; mitigación; modelación.*

INTRODUCCIÓN

La Rs representa una fuente importante de CO_2 a la atmósfera y es sensible al cambio de uso del suelo y a las condiciones climáticas. En México, las emisiones de CO_2 por cambio de uso del suelo aumentaron 208% entre 1990 y 2015 (SEMARNAT-INECC, 2018). Sistemas con mayor cobertura vegetal, como los agroforestales, mejoran el microclima, incrementan el COS y modulan la Rs (Dowhower *et al*., 2020). Un manejo adecuado puede reducir emisiones y aumentar el secuestro de carbono (Sainju *et al*., 2008). Se ha observado que menor cobertura vegetal incrementa la Rs, mientras que su restauración la reduce (Ayala-Montejo *et al*., 2022). Comprender la dinámica de la Rs es clave para orientar estrategias de mitigación y adaptación climática (Serran *et al*., 2017). Por tanto, entender su dinámica es clave para estrategias de mitigación y adaptación climática. El objetivo fue: (a) analizar la variación espacial y temporal de la Rs, (b) modelarla bajo distintos escenarios y (c) evaluar su sensibilidad ante cambios de uso del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el ecosistema templado del centro de México. Se evaluaron 12 sistemas 1) sistema agrícola de monocultivo de maíz (SAM), 2) sistema agrícola de monocultivo de maíz con biochar agregado (BIO), 3) sistema agrícola con avena y de pastoreo rotativo (SPR), 4) sistema agrosilvopastoril rotativo (SASP), 5) sistema agroforestal (SAF), 6) sistema forestal templado de pino (SFP), 7) sistema forestal templado de pino, oyamel y aile (SFPOA), 8) sistema forestal templado pino y oyamel (SFPO), 9) sistema forestal templado de oyamel (SFA), 10) Sistema de pastos cultivado (SPC), 11) sistema de invernadero (SI) y 12) suelo sin vegetación (SSV).

Diseño experimental. En cada uno de los 12 sistemas se establecieron 3 sitios de muestreo como réplicas, seleccionados bajo un diseño completamente aleatorizado para garantizar independencia entre observaciones. En cada sitio se realizaron mediciones de respiración del suelo (Rs), variables ambientales y contenido de carbono orgánico del suelo (COS), con el fin de comparar los sistemas y evaluar las relaciones entre variables.

Recolección de datos. Se midió la Rs con una cámara LICOR 8100 cada 30 minutos durante 24 horas en verano, otoño e invierno. También se determinó el COS a tres profundidades (0–30 cm), a partir de 102 muestras recolectadas con una barrena de doble anillo y analizadas con un TOC-V Shimadzu. Se registraron variables ambientales (temperatura del aire y del suelo, humedad, precipitación y radiación solar) con sensores y una estación meteorológica portátil.

Análisis estadístico y modelación. Se realizaron análisis ANDEVA, correlaciones de Pearson y regresión múltiple para modelar la Rs y evaluar su sensibilidad a cambios en temperatura, humedad, cobertura vegetal y contenido de COS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la variación espacial y temporal de la respiración del suelo. La Rs fue menor en sistemas sin vegetación, como invernaderos, y mayor en sistemas con manejo agropecuario (agrosilvopastoriles y agrícolas) (Cuadro 1) con tasas entre 0.15 ± 0.02 y 1.78 ± 0.92 g CO_2 m^2 h^{-1} ($p < 0.05$). Esto coincide con estudios que atribuyen al manejo del suelo un aumento en emisiones de CO_2 (Jat *et al*., 2016), y que sitúan el cambio de uso del suelo como responsable del 20% de las emisiones globales (SEMARNAT-INECC, 2018).

El COS fue mayor en sistemas con cobertura vegetal (hasta 211.01 t C ha^{-1}) y menor en suelos desnudos (32.51 t C ha^{-1}), con una relación inversa entre Rs y COS. Esto se explica por la mineralización de materia orgánica tras perturbaciones del suelo, que aumenta la disponibilidad de carbono y la actividad microbiana (Mukumbuta *et al*., 2019).

La Rs mostró correlación positiva con la temperatura ambiente y del suelo en verano y otoño, y negativa con la humedad en invierno (Cuadro 2), lo cual concuerda con lo señalado por Bai *et al*. (2015), quienes describen una relación exponencial positiva entre Rs y temperatura, y lineal positiva con la humedad del suelo.

Cuadro 1. Respiración y carbono almacenado del suelo.

Sistema		% cobertura del suelo	Rs g CO_2 m^{-2} h^{-1}	Rs t ha^{-1}	C almacenado t ha^{-1}	% emitido	Total neto t ha^{-1}
Sistemas forestales	SFA	93	0.59±0.19d,e	14.75	191.98	7.7	177.23
	SFP	93	0.57±0.24d,e,f	14.1	180.44	7.8	166.34
	SFPO	91	0.27±0.16f,g	10.57	170.86	6.2	160.29
	SFPOA	96	0.45±0.13e,f,g	10.8	211.01	5.1	200.21
Sistemas agroforestales	SAF	77	0.81±0.18c,d	19.03	81.34	23.4	62.31
	SASP	70	1.04±0.33b	24.55	81.91	30	57.36
Sistemas agrícolas	BIO	27	0.74±0.69c,d	20.32	141.55	14.4	121.23
	SAM	37	0.99±0.44b	23.33	66.78	34.9	43.45
Sistemas de pastoreo	SPR	19	1.78±0.92a	39.91	71.14	56.1	31.23
Testigo	SI	30	0.15±0.02g	3.62	32.52	11.1	28.9
	SPC	50	0.91±0.29b,c	21.7	92.6	23.4	70.9
	SSV	0	0.25±0.04g	12.15	50.31	24.2	38.16

Cuadro 2. Análisis de correlación de respiración del suelo entre variables climáticas

Variable / Temporada	Hs	Ts	TA	P	RADSO
VERANO	0.02	0.61	0.56	0.00	-0.03
OTOÑO	-0.11	0.53	0.46	-0.06	0.42
INVIERNO	-0.24	0.51	0.56	*	0.03

Nota: Hs = humedad del suelo, Ts = temperatura del suelo, TA = temperatura ambiental, P = precipitación, RADSO = radiación solar.

Modelación y sensibilidad de la respiración del suelo. Se ajustó un modelo para estimar Rs considerando cobertura del suelo (C), COS, temperatura (Ts), humedad del suelo (Hs) y radiación solar (RADSO): Rs = 0.536 -0.001610 *C (%) - 0.003193*COS (t ha^{-1}) + 0.352 Hs (m^3 m^{-3}) + 0.01545 Ts (°C) + 0.02371*Ta (°C) + 0.000339 RADSO (W m^{-2}).

Este modelo explicó el 33% de la variación observada (R^2 ajustado: 34.86%), siendo significativo en todas las variables incluidas (Cuadro 3). La variación no explicada por el modelo (67%) podría atribuirse a factores no incluidos en el modelo, como las prácticas de manejo (por ejemplo, la labranza), variables relacionadas con el desarrollo y la fisiología de la vegetación, la biomasa radicular, la actividad microbiana, la calidad del residuo vegetal, así como a propiedades fisicoquímicas del suelo (Wang *et al.*, 2010).

En la Figura 1 se presenta la proyección de la Rs, bajo el enfoque de sensibilidad al aumentar 1 y 2°C en temperatura, así como ±10 y ±20% en cobertura del suelo, humedad del suelo y COS. Proyecciones de sensibilidad mostraron que el aumento de temperatura, la reducción de cobertura y la humedad elevan las emisiones de CO_2 (Figura 1a). En contraste, el incremento de cobertura vegetal disminuye las emisiones incluso bajo mayor

temperatura (Figura 1b), lo que resalta el potencial de la restauración del suelo como estrategia de mitigación (Ontl *et al*., 2020).

Cuadro 3. Validación del modelo de Rs.

		S **0.5058**	**R-cuad.** **35.32%**	**R-cuad. (ajustado)** **34.86%**	**R-cuad. (pred)** **33.88%**
Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0.536	0.105	5.12	0.000	
Cobertura del suelo (%)	-0.001610	0.000589	-2.73	0.006	1.33
COS (t ha^{-1})	-0.003193	0.000550	-5.81	0.000	2.28
Humedad del suelo (m^3 m^{-3})	0.352	0.164	2.15	0.032	1.19
Temperatura del suelo (°C)	0.01545	0.00642	2.41	0.016	3.15
Temperatura ambiental	0.02371	0.00501	4.73	0.000	2.59
Radiación Solar (W m^{-2})	0.000339	0.000072	4.69	0.000	1.44

Impacto de prácticas de conservación del suelo. La implementación de prácticas como agroforestería en zonas agrícolas podría aumentar el almacenamiento de carbono en 0.94 x 10^{-2} Gt y evitar la pérdida de 5.30 x 10^{-2} Gt de C por deforestación. Mukumbuta *et al.* (2019) señalan que la rotación y conservación mejoran el almacenamiento de COS, mientras que Soto-Pinto *et al.* (2010) destacan que los SAF permiten conservar carbono y reducir emisiones por degradación.

En México, se estima que aplicar estas prácticas en zonas templadas puede reducir emisiones en agricultura de 26.54 a 19.90 x 10^{-2} Gt C, y en bosques de 23.99 a 7.95 x 10^{-2} Gt C (Cuadro 4). Lograr lo antes mencionado se traducirá en la obtención de co-beneficios entre mitigación y adaptación al cambio climático, es decir, los efectos que no solo se ven reflejados en la reducción de las CO2 y almacenamiento de COS, sino afectar de manera positiva en sectores económicos y socioculturales (Tschora y Cherubini, 2020).

La protección forestal mejorada puede promover un uso más sostenible de la biomasa y reducir la degradación de la tierra, con los co-beneficios de la reducción de las emisiones de GEI y la mejora de la salud humana (Olsson *et al*., 2019). La incorporación de cultivos intercalados en los sistemas de producción agrícola, aplicando un enfoque de gestión integrada del paisaje, puede proporcionar co-beneficios para la gestión de la degradación de la tierra y otros objetivos ambientales, así como reducir la contaminación del agua (Cacho *et al.* 2018).

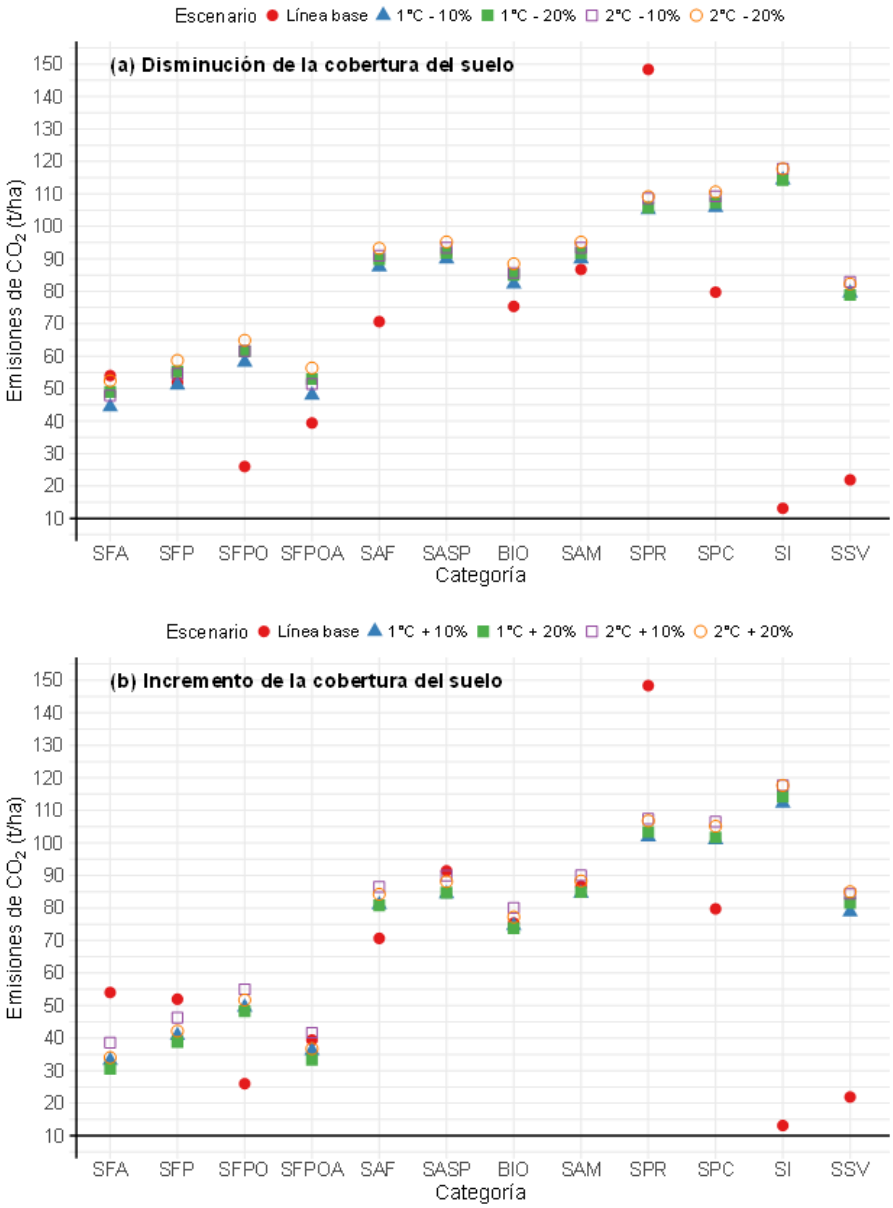


Figura 1. Proyección de la respiración del suelo.
Nota: Puntos rojos corresponden a la Rs base en el sistema evaluado.

Cuadro 4. Proyección de la emisión con y sin prácticas de conservación del suelo.

Sistema	Superficie ha	C emitido Gt (10^{-2})		
		Actual	Proyección	
			Sin prácticas	Con practicas
Bosque templado	11,158,074.35	13.25	23.99	7.95
Agricultura	8,126,517.47	18.96	26.54	19.90

Nota: Datos obtenidos para la zona templada de México.

Por otro lado, incorporar cultivos perennes tiene el potencial de combinar la producción de alimentos, producir más en menor espacio, con el secuestro de carbono así compensar entre la producción de alimentos y la mitigación del cambio climático (Crews *et al.* 2018). Los sistemas agroforestales ofrecen soluciones de múltiples ganancias que son relevantes para abordar los principales desafíos tanto ambientales como económicos. Esto por la diversificación de la producción y la creación de nuevos puestos de trabajo (Soussana *et al*. 2019)

CONCLUSIONES

En base a las temporadas evaluadas, la temperatura ambiental y del suelo son los principales factores que incrementan o disminuyen la Rs. Mientras que por manejo estas variables influyen principalmente en SAF (verano) y SPR (otoño e invierno). Por otro lado, la variación de la Rs en el sistema forestal (SFP), en las tres temporadas, se atribuye a la interacción de la comunidad vegetal con las variables climáticas, ya que este sitio es el más conservado de los 12 manejos que se pueden observar en la cobertura del suelo.

La mayoría de los sistemas muestran un incremento en las emisiones de CO_2 en comparación con la línea base, lo que sugiere que la reducción de cobertura, junto con el aumento de temperatura y la disminución de la humedad del suelo, eleva las emisiones.

Por otro lado, en el segundo escenario los niveles de emisión de CO_2 tienden a ser menores que en el escenario de disminución de cobertura. Esto indica que el aumento de cobertura puede mitigar las emisiones, incluso en condiciones de mayor temperatura. Aunque hay variaciones, las emisiones en casi todos los sistemas están más cercanas a la línea base en comparación con el escenario de disminución de cobertura, lo que muestra una menor sensibilidad a las condiciones de cambio climático.

BIBLIOGRAFÍA

Ayala-Montejo, D., Valdés-Velarde, E., Benedicto-Valdés, G. S., Escamilla-Prado, E., Sánchez-Hernández, R., Gallardo, J. F., & Martínez-Zurimendi, P. (2022). Soil biological activity, carbon and nitrogen dynamics in modified coffee agroforestry systems in Mexico. Agronomy, 12(8), 1794. https://doi.org/10.3390/agronomy12081794

Bai, J., Wang, J., Chen, X., Luo, G. P., Shi, H., Li, L. H., & Li, J. L. (2015). Seasonal and inter-annual variations in carbon fluxes and evapotranspiration over cotton field under drip irrigation with plastic mulch in an arid region of Northwest China. Journal of Arid Land, 7(2), 272–284. https://doi.org/10.1007/s40333-014-0012-x

Cacho, J. F., Negri, M. C., Zumpf, C. R., & Campbell, P. (2018). Introducing perennial biomass crops into agricultural landscapes to address water quality challenges and provide other environmental services. WIREs Energy and Environment, 7, e275. https://doi.org/10.1002/wene.275

Crews, T. E., Carton, W., & Olsson, L. (2018). Is the future of agriculture perennial? Imperatives and opportunities to reinvent agriculture by shifting from annual monocultures to perennial polycultures. Global Sustainability, 1, e11. https://doi.org/10.1017/sus.2018.11

Dowhower, S. L., Teague, W. R., Casey, K. D., & Daniel, R. (2020). Soil greenhouse gas emissions as impacted by soil moisture and temperature under continuous and holistic planned grazing in native tallgrass prairie. Agriculture, Ecosystems & Environment, 287, 106647. https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106647

Jat, M. L., Dagar, J. C., Sapkota, T. B., Yadvinder-Singh, Govaerts, B., Ridaura, S. L., Saharawat, Y. S., Sharma, R. K., Tetarwal, J. P., Jat, R. K., Hobbs, H., & Stirling, C. (2016). Climate change and agriculture: Adaptation strategies and mitigation opportunities for food security in South Asia and Latin America. Advances in Agronomy, 137, 127–235. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2015.12.005

Mukumbuta, I., Shimizu, M., & Hatano, R. (2019). Short-term land-use change from grassland to cornfield increases soil organic carbon and reduces total soil respiration. Soil and Tillage Research, 186, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.still.2018.09.010

Olsson, L., Barbosa, H., Bhadwal, S., Cowie, A., Delusca, K., Flores-Rentería, D., Hermans, K., Jobbágy, E., Kurz, W., Li, D., Sonwa, D. J., & Stringer, L. (2019). Land degradation. En P. R. Shukla, J. Skea, E. C. Buendía, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. P. Pereira, P. Vyas, E. Huntley, ... J. Malley (Eds.), Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems (pp. 345–436). Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/srccl/

Ontl, T. A., Janowiak, M. K., Swanston, C. W., Daley, J., Handler, S., Cornett, M., Hagenbuch, S., Handrick, C., McCarthy, L., & Patch, N. (2020). Forest management for carbon sequestration and climate adaptation. Journal of Forestry, 118(1), 86–101. https://doi.org/10.1093/jofore/fvz062

Sainju, U. M., Jabro, J. D., & Stevens, W. B. (2008). Soil carbon dioxide emission and carbon content as affected by irrigation, tillage, cropping system, and nitrogen fertilization. Journal of Environmental Quality, 37(1), 98–106. https://doi.org/10.2134/jeq2006.0392

SEMARNAT-INECC. (2018). Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). https://cambioclimatico.gob.mx/comunicacion-nacional-2018/

Serran, E. Z., Nuñez, M., & Valleter, E. (2017). Respiración de dióxido de carbono de suelo en bosque tropical húmedo – Gamboa, Panamá. I+D Tecnológico, 13(2), 49–54. https://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico/article/view/1714/2450

Soto-Pinto, L., Anzueto, M., Mendoza, J., Jiménez Ferrer, G., & de Jong, B. (2010). Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. Agroforestry Systems, 78(1), 39–51. https://doi.org/10.1007/s10457-009-9247-5

Soussana, J. F., Lutfalla, S., Ehrhardt, F., Rosenstock, T., Lamanna, C., Havlík, P., Richards, M., Wollenberg, E., Chotte, J. L., Torquebiau, E., Ciais, P., Smith, P., & Lal, R. (2019). Matching policy and science: Rationale for the '4 per 1000 - soils for food security and climate' initiative. Soil and Tillage Research, 188, 3–15. https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.002

Tschora, H., & Cherubini, F. (2020). Co-benefits and trade-offs of agroforestry for climate change mitigation and other sustainability goals in West Africa. Global Ecology and Conservation, 22, e00919. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00919

Wang, X., Jiang, Y., Jia, B., Wang, F., & Zhou, G. (2010). Comparison of soil respiration among three temperate forests in Changbai Mountains, China. Canadian Journal of Forest Research, 40, 788–795. https://doi.org/10.1139/x10-010.

BASES PARA FOMENTAR LA ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO DESDE Y EN LOS SUELOS DEL PAÍS

Alejandro Ismael Monterroso Rivas[1]; Patricia Ruíz García[2]; Yadihra Cruz Sánchez[3]; Leticia Citlaly López Teloxa[3]

[1] Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Texcoco, Estado de México. México.
[2] Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Circuito de la Investigación Científica s/n, Ciudad de México, México.
[3] Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. Km 38.5 carretera México-Texcoco, Texcoco, Estado de México. México.

Correo del autor de correspondencia: amonterrosor@chapingo.mx

RESUMEN

Las evidencias muestran que el planeta se encuentra en constante cambio y particularmente el clima se vuelve más errático e impredecible. El objetivo del presente trabajo fue desarrollar y mostrar un visor web tipo geovisualizador que contenga estudios de impactos del cambio climático sobre los suelos de México y que pueda ser usado para fomentar la adaptación. Los resultados obtenidos se muestran en el sitio web y su geovisualizador asociado (*https://siacc.chapingo.mx*) que contiene cinco elementos: Vulnerabilidad climática, Seguridad alimentaria, Suelos conservados, Bosques resilientes y Agricultura adaptada. Se hace especial atención en el apartado de suelos mostrando las primeras cartografías temáticas que se encuentran disponibles para consulta. El sitio aún se encuentra en elaboración y mantenimiento, pero ha mostrado ser una herramienta capaz de transmitir información clave, regional y a buen nivel de detalle sobre los impactos del cambio climático sobre los suelos del país. Se sugiere alimentar con más información para potencializar la herramienta.

PALABRAS CLAVE: *Adaptación; estrategias en suelos; geovisualizador; mitigación.*

INTRODUCCIÓN

Las evidencias muestran que el planeta se encuentra en constante cambio y particularmente el clima se vuelve más errático (IPCC, 2023a). Los expertos han puesto especial atención a los impactos que se tendrán por cambio climático y se ha llegado a la conclusión que algunos ya son evidentes y que es necesario atenderlos urgentemente (IPCC, 2023a). Particularmente aquellos que se refieren a la producción de alimentos (IPCC, 2023b) donde el suelo juega un papel clave.

Ante la diversidad de ecosistemas y regiones productoras de alimentos, el problema se dimensiona mayor al querer establecer recetas de adaptación similares para todos. Aquí, conviene subrayar que ADAPTACIÓN al cambio climático puede tener varias connotaciones, por ejemplo, en los sistemas humanos se refiere "al proceso de ajuste a los efectos del clima actual o futuro, para disminuir el daño o detonar las oportunidades";

por su parte, en los sistemas naturales se refiere "al proceso de ajuste al clima y sus efectos, donde la intervención humana puede facilitar el proceso" (IPCC, 2023c).

Es decir, las recomendaciones de ajustes en los procesos productivos deben estar sustentadas en conocer los impactos tanto al clima actual como al clima futuro. Ante esto, algunas preguntas de investigación que surgen son: ¿Cuáles serán los impactos del cambio climático en la actividad agrícola y en los suelos del país? ¿Cuáles son los tipos de suelos y cultivos con mayor vulnerabilidad? ¿Por qué? ¿Cuáles son las regiones con mayor o menor impacto? ¿Es posible diferenciar estrategias de adaptación por cultivo, especie, región y temporalidad? El objetivo del presente trabajo es desarrollar y mostrar un visor web tipo geovisualizador que contenga estudios de impactos del cambio climático sobre los suelos de México y que pueda ser usado para fomentar la adaptación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estimar de qué manera afecta el cambio climático a los suelos significa agregar complejidad e incertidumbre al ya complicado sistema de producción agrícola de nuestro país. La agricultura es una actividad que realiza el ser humano y que constantemente realiza ajustes y cambios en respuesta a las condiciones cambiantes del medio productivo. Esta complejidad es difícil de capturar, por lo que en este estudio se enfocan esfuerzos únicamente en la evaluación agronómica del cambio climático sobre los suelos.

Se revisó la información cartográfica disponible, particularmente la generada en el Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo, que muestra los impactos por cambio climático en suelos y actividades agrícolas y forestales del país. Se elaboró una base de datos.

Las variables climáticas consideradas, tanto actuales como futuras con cambio climático, fueron temperatura máxima, mínima, media, precipitación total anual. Aquí se consideraron los diferentes escenarios de cambio climático según modelo (HADGEM, ECHAM, MPI, GFDL, etc.), emisiones y concentraciones (A2, B2, RCP8.5, RCP6.5, RCP4.5, SSP5_8.5, SSP6, etc.) y los horizontes de tiempo que se hayan analizado (2100, 2090, 2070, 2050 o 2030).

Fue necesario homologar la cartografía al mismo sistema de coordenadas, proyección y datum. Sobre la escala y resolución de la cartografía se está condicionando a la propia generación de los mapas. Al momento, la mayoría de los estudios que se conocen en la universidad han sido elaborados a escala 1:250,000, pero se sabe también de estudios locales incluso a escala 1:50,000. Toda la cartografía se exportó y homologó al mismo formato requerido por el visor web, que es GeoJSON.

Creación del Visor web. El visor web se construyó desde una forma básica a mayor complejidad. Contiene el desarrollo de programación en el software libre LeafLet 2.0 (Agafonkin, 2025).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Visor web. Se construyó un sitio web institucional que se encuentra disponible en el siguiente enlace: https://siacc.chapingo.mx/ y que contiene cinco elementos:

Vulnerabilidad climática, Seguridad alimentaria, Suelos conservados, bosques resilientes y agricultura adaptada (Figura 1).



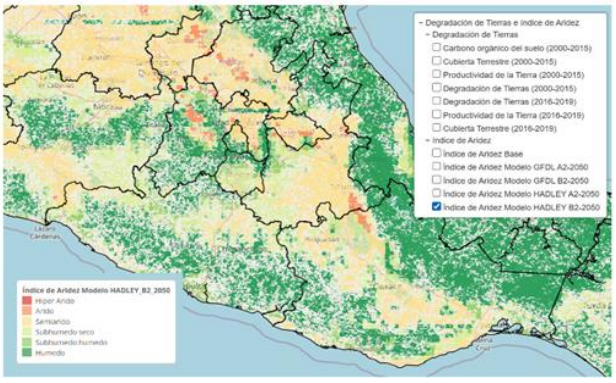


Figura 1. Elementos que componen el Sistema de Información y Geovisualizador en el tema de Suelos conservados.

Mensajes clave sobre los Suelos de México. En el apartado de Suelos conservados se incluyen algunos resultados relevantes del último Informa Nacional de Degradación de Tierras en México (Conaza-Uach, 2023):

Sobre las tierras degradadas: La superficie de la tierra que se degradó en México en el periodo 2016-2019 fue de 15.2% que equivale a poco menos de 300 mil km2. Hasta el año 2015 la proporción de la tierra degradada fue de 56.7%. En las zonas afectadas la superficie degradada en 2016-2019 fue de 10.6% y en el periodo de referencia 2000-2015 fue de 39.2%.

Sobre la población afectada: En México, la población que vive en tierras degradadas es el 69% de la población total (86.9 millones), de las cuales 44.6 millones son mujeres y 42.3 millones son hombres. El total de la población que vive en las zonas afectadas es de 59.2 millones de personas, que equivale a 76.7% del total nacional. De los anteriores, 28.9 millones son hombres y 30.2 millones son mujeres.

Sobre la productividad de la Tierra: Permaneció estable en 87% de la superficie nacional, 11.7% tuvo mejora y 1.2% tuvo tendencia de degradación. En las zonas afectadas 75.8% de la superficie permaneció estable, 1.1% degradada y 1.6% mejora.

Sobre la afectación por sequías: En el periodo 2000-2019 la menor superficie afectada fue 25% (2015) y la mayor fue 77% (en los años 2009 y 2011). En las zonas afectadas, la sequía estuvo presente en 21.5% (2018) y 42.8% (en 2019) de la superficie total.

Fomento de adaptación al cambio climático. El cambio climático y los desastres pueden influir negativamente en la búsqueda de la seguridad alimentaria, es fundamental atender tres necesidades básicas que requiere el sector: documentar los impactos actuales y los que se podrán presentar por cambio climático en la producción agrícola, hacer accesible la información a los usuarios que la requieren y además contar con un portafolio de medidas de adaptación en respuesta al cambio climático. El portal y el geovisualizador prometen contar con información útil y relevante para el sector.

Con lo anterior se podrán establecer las bases para el fomento de medidas de adaptación al cambio climático en la producción agrícola y forestal del país. Es decir, se

podrá consultar en un solo sitio información climática y de cambio climático que permita dimensionar la magnitud del problema.

CONCLUSIONES

Es posible construir un geovisualizador que muestre cartografía histórica y actual sobre los impactos del cambio climático, particularmente sobre los suelos de México. En el país y en la Universidad se cuenta con información a diferentes escalas y con diversos propósitos que deben ser analizados para incluirse en sitios institucionales.

BIBLIOGRAFÍA

Agafonkin, V. (2025). An open-source JavaScript library for interactive maps, Leaflet. Available at: https://leafletjs.com/ (Acceso: 17 April 2025).

CONAZA-UACh. (2023). Informe nacional 2022 de acciones contra la desertificación, degradación de tierras y sequía en México.

IPCC. (2023a). Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability. En Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability. https://doi.org/10.1017/9781009325844

IPCC. (2023b). Contributors to the Working Group II Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report. En Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability (p. 2964). https://doi.org/10.1017/9781009325844.031

IPCC. (2023c). Food, Fibre and Other Ecosystem Products. En Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability (pp. 713–906). https://doi.org/10.1017/9781009325844.007.

CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE SUELOS EN CD. UNIVERSITARIA DE MONTERREY NL: ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROPIEDADES Y METALES PESADOS

David Clemente López Pérez[1]; Teresa de Jesús Montalvo Herrera[1]; Astrid Iriana Sánchez Vázquez[1]

[1]Universidad Autónoma de Nuevo León, Ciudad Universitaria s/n, CP 66455, San Nicolás de los Garza, N.L., México

Correo del autor de correspondencia: astrid.sanchezvz@uanl.edu.mx

RESUMEN

Se realizó un estudio de caracterización de suelos en dos sitios de Cd. Universitaria, dentro de la Zona Metropolitana de Monterrey. Se analizaron muestras de suelo durante un año (de agosto de 2024 a julio de 2025). Se determinaron la humedad, el pH, la densidad aparente (Dap), así como la presencia de metales pesados. Los valores de pH variaron de neutros a medianamente alcalinos (6.8 a 8.0). La Dap reveló un alto porcentaje de gas en todas las muestras, mostrando el valor más alto de 92%. Adicionalmente, el análisis de metales pesados reveló la presencia de cadmio (Cd) en concentraciones de entre 2.74 mg kg^{-1} y 3.11 mg kg^{-1}, las cuales se encuentran dentro de los límites permitidos por la NOM-147-SEMARNAT-2004 para suelos agrícolas. Los resultados para plomo (Pb) estuvieron por debajo del límite de detección. Con estos resultados, se debe discutir las implicaciones que conllevan estas características del suelo y la necesidad de monitoreo continuo para la protección ambiental y la salud humana.

PALABRAS CLAVE: *Cadmio; densidad; humedad; metales pesados; pH; plomo; remediación; suelo urbano.*

INTRODUCCIÓN

La calidad del suelo es un factor crítico para la sostenibilidad ambiental, la agricultura y la salud pública (FAO, sf.; UNAM, s.f.; Manejo de suelo, s.f.). En áreas urbanas y metropolitanas, como la de San Nicolás de los Garza, Nuevo León, los suelos están expuestos a diversas fuentes de contaminación, incluyendo emisiones vehiculares, actividades industriales y desechos urbanos. La caracterización fisicoquímica de los suelos es fundamental para entender su estado actual y su capacidad para retener o liberar contaminantes. Este estudio se enfoca en la evaluación de propiedades clave del suelo como el pH, el contenido de humedad, la densidad y la presencia de metales pesados, específicamente cadmio y plomo, ya que estas influyen de manera fundamental en su calidad, salud y capacidad para sostener la vida y funcionar como un componente vital del ecosistema. La caracterización de suelo y determinación de metales pesados son cruciales para identificar riesgos directos a través del contacto con el suelo o indirectos mediante la cadena alimentaria y la contaminación del agua subterránea. Comprender

las propiedades del suelo permite tomar decisiones informadas sobre el manejo del terreno y el diseño de estrategias de remediación en caso de contaminación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se basó en el análisis de muestras de suelo recolectadas del área de estacionamiento dentro de Cd. Universitaria. Se realizaron las siguientes pruebas en laboratorio para cada una de las muestras:

Caracterización general de campo: Se realizaron mediciones de consistencia (mojado, húmedo, seco), estructura, color, consistencia, textura, y presencia de rocas, raíces y carbonatos, según la NOM-021-RECNAT-2000.

Caracterización de pH: Se utilizó papel tornasol y tiras reactivas para medir el pH de las muestras, con una relación 1:1 de suelo y agua. Se clasificó el pH de acuerdo con la NOM-021-RECNAT-2000.

Determinación de humedad: Las muestras de suelo se pesaron antes y después de ser calentadas en un horno a 110 °C durante 30 minutos para calcular el porcentaje de humedad, según la ASTM D2216.

Determinación de densidad: Se midió el porcentaje de gas en el suelo mezclando una cantidad conocida de suelo con agua en una probeta y midiendo la diferencia en el volumen final, por medio de la técnica común de desplazamiento de volumen.

Digestión de suelo y análisis de metales pesados: Se realizó una digestión ácida en 11 muestras compuestas para la posterior determinación de cadmio (Cd) y plomo (Pb) mediante análisis espectrofotométrico, con un enfoque en los LMP por la NOM-147-SEMARNAT-2004.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados clave de las pruebas de laboratorio.

Caracterización de los suelos *in situ*. La humedad de las muestras varió de húmeda a seca. Las texturas predominantes fueron arcilloso-arenoso, franco-arcilloso-arenoso, franco-arcilloso-limoso y franco-limoso. La consistencia de las muestras húmedas fue suelta, mientras que las secas tendieron a ser firmes.

pH. Las muestras presentaron un rango de pH de 6.8 a 8.0, clasificándose como neutras o medianamente alcalinas (SEMARNAT, 2000). Las muestras 3 y 5 mostraron los pH más bajo y más alto, mientras que el resto de las muestras presentaron pH de 7, mayoritariamente.

Humedad. Los porcentajes de humedad fueron generalmente bajos. El valor más alto se encontró en la muestra 3, con un 32.66%, lo cual se atribuyó a su proximidad a un árbol en crecimiento. En el segundo periodo de tiempo estudiado, variaron entre 0.09% y 1.263%, mientras que en el primer periodo de tiempo evaluado variaron entre 10.91% y 32.66%. Se observa una disminución de humedad en los meses iniciales del año, lo que concuerda con la sesión seca de temporada de lluvia (EOS Data Analytics, s.f).

Las muestras 1 y 4 eran muestras compactas, mientras que las muestras 2 y 3 presentaban raíces y maleza. Las muestras 5, 7-11 presentaban raíces y rocas, y la muestra 6 solo raíces.

Cuadro 1. Propiedades físicas del suelo.

Sitio	Muestra	Humedad	Color	Estructura	Textura
Agosto-Diciembre 2024	1	Seco	Pardo Rojizo	Firme	FL
	2	Húmedo	Pardo Rojizo	Suelta	FL
	3	Húmedo	Negro	Suelta	R
	4	Seco	Café oscuro	Firme	FL
	5	Seco	Café oscuro	Firme	FL
	6	Humedo	Café oscuro	Firme	FL
Enero-Julio 2025	7	Humedo	Café claro	Suelta	Ra
	8	Seco	Café oscuro	Suelta	Fra
	9	Humedo	Café oscuro	Suelta	Fra
	10	Humedo	Café oscuro	Suelta	FL
	11	Seco	Café Claro	Firme	Ra

Textura: Fl=franco limosa; Rfl=arcillo franco limosa; Ra= arcillo arenosa; Fra= franco arcillo arenosa; R=arcillosa.

Cuadro 2. Porcentaje de humedad, pH y % de gas de las muestras de suelo.

	Muestra	% humedad	pH	Clasificación según NOM-021-RECNAT-2000	% de gas en el suelo
Agosto-Diciembre 2024	1	18.59	7	Neutro	24
	2	10.91	7		30
	3	32.66	6.8		40.1
	4	12.53	7.5		56.19
	5	16.50	8	Medianamente alcalino	42
	6	18.35	7.5		30
Enero-Julio 2025	7	1.263	7	Neutro	71
	8	0.09	7		92
	9	0.392	7		91
	10	0.24	7		50
	11	0.289	7		71.5

Densidad aparente. El análisis de densidad mostró que el porcentaje de gas en las muestras era relativamente alto (> 50%) en la mayoría de los casos del segundo periodo de tiempo muestreado. En el primer periodo de tiempo muestreado, los porcentajes de gas en el suelo variaron entre 24% y 56.19%. El porcentaje de gas ayuda a entender la dinámica que se tendrá en este. Los valores que van desde 24 hasta un 40% son suelos con una dinámica moderada entre agua y aire, lo que indica que tienen buena aireación. Esto es porque tienen buen porcentaje de humedad en el suelo y buen espacio poroso para el aire, lo que permite un buen equilibrio entre estos dos. Entre más cercano esté a 40%, significa que tendrá una aireación ideal en el suelo.

Aquellas muestras que superan el 40% de gas en el suelo, consisten en suelos muy aireados, pero con bajo porcentaje de humedad. Esto es beneficioso para las raíces y para los microorganismos aerobios, aunque de alguna manera, aquellas plantas que necesiten

más humedad no podrían crecer en estas condiciones. Estos suelos suelen estar en zonas más áridas, ya que nos indican un suelo más seco con menos agua retenida en poros.

Según el análisis, podemos observar que en todas las muestras recolectadas está presente un nivel relativamente alto de gas >50%. El porcentaje más alto se encontró en la muestra 8 (92%), esto se podría deber a la textura (franco-arcilloso-arenoso) y consistencia (suelta) de la muestra; estas características permiten mayor presencia de poros de aire entre partículas. La muestra 9 (91%) tiene condiciones familiares, presenta una estructura y consistencia suelta, lo que sugiere una gran cantidad de poros entre las partículas del suelo; esto facilita la presencia de aire.

Por otro lado, las muestras 7 (71%) y 10 (50%) mostraron porcentajes de gas menores. La muestra 1 presentó el valor más bajo, debido a su textura (franco-limosa) que tiende a retener más agua (UNAM, s.f.), reduciendo así la porosidad. La muestra 9, con textura arcillo-arenosa, se encontraba húmeda, lo que favorece la absorción de agua y reduce el volumen de aire atrapado.

Análisis de cadmio y plomo: Las concentraciones de cadmio fueron de 27.4 mg L^{-1} y 31.1 mg L^{-1}, mientras que las concentraciones de plomo fueron de 31.48 mg L^{-1} y 16.7 mg L^{-1}, valores que están dentro del límite permitido por la NOM-147-SEMARNAT-2004. Los resultados para plomo fueron negativos para el segundo periodo de tiempo de muestreo y de cadmio para el primer periodo de tiempo de muestreo, indicando que las concentraciones estaban por debajo del límite de detección del método de análisis. Es posible que esto se deba a los volúmenes y concentraciones con los que se trabajó para la obtención de las muestras estandarizadas.

Cuadro 3. Concentraciones de Metales Pesados en Suelo (LMP: Pb 400 mg/L, Cd 37 (mg L^{-1})

	No. muestra	**Cd (**mg L^{-1}**)**	**Pb (**mg L^{-1}**)**
Agosto-Diciembre 2024	1	27.4	No medible
	2	31.1	
Enero-Julio 2025	3	No medible	31.48
	4		16.7

Dentro de estos resultados también se puede observar que, en el tiempo de estudio con más alta porosidad y menor humedad, hay concentración de plomo, pero no de cadmio. Lo contrario para cuando se tiene mayor humedad y menor porosidad. Esto puede deberse a que en un suelo con alta porosidad puede drenar más rápidamente, lo que lleva a un menor contenido de humedad y, potencialmente, a una menor movilidad de los elementos potencialmente tóxicos (EPT). Por el contrario, un suelo con baja porosidad puede retener más agua, lo que podría aumentar la solubilización y el transporte de los EPT, en este caso el cadmio, que es un elemento más soluble en comparación con el plomo.

Los resultados sugieren una incongruencia debido a que la presencia de Pb en suelos suele ser más común que la de Cd; es posible que esto se deba a los volúmenes y concentraciones con los que se trabajó para la obtención de las muestras estandarizadas.

El análisis de metales pesados sugiere que las concentraciones de cadmio están dentro de los límites normativos, así como las de plomo. Sin embargo, la presencia de estos metales, aunque en niveles bajos, resalta la importancia del monitoreo continuo.

CONCLUSIONES

La caracterización de las muestras de suelo de Cd. Universitaria, de la Zona Metropolitana de Monterrey, reveló que las propiedades fisicoquímicas son variables y están influenciadas por las condiciones locales, como la presencia de vegetación y el uso del suelo. Los suelos de la zona de Cd. Universitaria tienden a ser neutras a ligeramente alcalinas y, en su mayoría, con bajos niveles de humedad y alta porosidad.

La presencia de cadmio en niveles aceptables según la normativa vigente es un hallazgo importante, pero no debe descartar la necesidad de vigilancia. La poca detección de plomo subraya la importancia de optimizar las técnicas de muestreo y análisis para asegurar la precisión.

Este estudio sirve como un punto de partida para futuros análisis más extensos que permitan un mejor entendimiento de la calidad del suelo en la región y la implementación de estrategias de remediación y gestión ambiental proactivas.

BIBLIOGRAFÍA

EOS Data Analytics. (s.f.). *Humedad del suelo: definición, importancia y métodos de medición*. EOS Data Analytics. Recuperado 11 de agosto del 2025, de https://eos.com/es/blog/humedad-del-suelo-definicion-importancia-y-metodos-de-medicion/.

Manejo del suelo. (s.f.). Recuperado de 11 de agosto del 2025, https://www.ctahr.hawaii.edu/mauisoil/a_factor_ts.aspx.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (s.f.). *Las propiedades del suelo*. Recuperado 11 de agosto del 2025, de https://www.fao.org/soils-portal/acerca-de-los-suelos/las-propiedades-del-suelo/es/.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), & Secretaría de Salud (SSA). (2004). *Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT-SSA1-2004, Protección ambiental-Suelo-Límites máximos permisibles de contaminantes para su reuso en agricultura*.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2000). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*.

Spag, G. (2021, 18 de mayo). *Qué es el PH y los diferentes tipos de suelos*. Grupo SPAG. Recuperado 11 de agosto del 2025, de https://www.grupospag.com/que-es-el-ph-y-los-diferentes-tipos-de-suelos/.

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (s.f.). *El suelo: Composición y propiedades*. Recuperado 11 de agosto del 2025, de http://www.objetos.unam.mx/quimica/suelo/.

El Suelo: Pasado, Presente y Futuro de la Vida

División V. Ciencias de Frontera y Multidisciplinarias del Suelo

ACTIVIDAD ENZIMÁTICA EN UN XEROSOL TRATADO CON NANOTUBOS DE CARBONO DE PARED MÚLTIPLE Y CULTIVADO CON MELÓN

Jessica E. Martínez Vázquez[1]; Fabián Fernández Luqueño[2]; Ana Margarita Rodríguez Hernández[3]

[1] Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Industrial, Zona Industrial, C.P. 25900, Ramos Arizpe, México.
[2] Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Avenida Instituto Politécnico Nacional 2508, C.P. 07360, Ciudad de México, México.
[3] Centro de Investigación en Química Aplicada, Enrique Reyna H. 140, San José de los Cerritos, C.P. 25294, Saltillo, México.

Correo del autor de correspondencia: elizabeth.martinez@cinvestav.mx

RESUMEN

Los nanotubos de carbono de pared múltiple (NTCPM) poseen propiedades fisicoquímicas que pueden modificar la actividad enzimática de los suelos, incluyendo los Xerosoles característicos de zonas áridas. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de distintas concentraciones de NTCPM sobre la actividad enzimática de un Xerosol cultivado con melón (*Cucumis melo* L.). Se aplicaron concentraciones de 0, 5, 25, 50 y 100 mg kg^{-1} de suelo, y se midió la actividad de catalasa, invertasa, fosfatasa alcalina y deshidrogenasa a los 15 y 30 días después de la aplicación. La actividad catalasa aumentó con la concentración de NTCPM, evidenciando mayor descomposición de H_2O_2. La invertasa no mostró un patrón definido de inhibición a corto plazo. La fosfatasa alcalina incrementó a los 15 días con concentraciones crecientes, pero disminuyó a los 30 días en concentraciones elevadas. La deshidrogenasa fue inhibida con el incremento de NTCPM, sugiriendo posibles efectos tóxicos o de inmovilización sobre la microbiota. Estos resultados indican que los NTCPM afectan diferencialmente la actividad enzimática en periodos cortos, con implicaciones en la calidad biológica del suelo y en la sostenibilidad de cultivos en ambientes áridos.

PALABRAS CLAVE: *Catalasa; deshidrogenasa; enzimas; fosfatasa alcalina; invertasa; suelos áridos*.

INTRODUCCIÓN

México presenta aproximadamente el 41% de su territorio clasificado como zonas áridas y semiáridas, donde se desarrollan diversos tipos de suelos característicos de estas condiciones climáticas, tales como Regosoles, Yermosoles o Xerosoles, entre otros (González, 2012). En particular, los Xerosoles, se caracterizan por su bajo contenido de materia orgánica, textura variable, poca capacidad de retención de agua y altos niveles de calcio debido a la presencia de yeso o cal (FAO-UNESCO, 1988). A pesar de que los Xerosoles tienen un potencial agrícola limitado, con prácticas de manejo adecuadas pueden ser utilizados productivamente en sistemas agrícolas adaptados.

La actividad enzimática del suelo se refiere a la capacidad de las enzimas, principalmente de origen microbiano, presentes en el suelo para catalizar reacciones químicas como la descomposición de la materia orgánica y la mineralización de nutrientes (Zuccarini *et al*., 2023). Estas enzimas participan directamente en los ciclos biogeoquímicos del carbono, nitrógeno y fósforo, los cuales son fundamentales para la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento vegetal. En Xerosoles, la actividad enzimática suele ser limitada debido a la escasa humedad y al bajo contenido de materia orgánica, condiciones que restringen la abundancia y actividad de las comunidades microbianas (Díaz *et al*., 2021). No obstante, incluso en estos entornos, la actividad enzimática constituye un parámetro sensible para evaluar la calidad biológica del suelo y su potencial productivo bajo esquemas de manejo sostenible.

Las enzimas del suelo son indicadores sensibles y tempranos de cambios en la salud edáfica, ya que responden rápidamente a modificaciones en el manejo agrícola y a variaciones en factores ambientales, antes que otros parámetros del suelo (Zuccarini *et al*., 2023). En este contexto, el estudio de la actividad enzimática no solo permite evaluar la calidad biológica del suelo, sino también comprender los efectos de factores abióticos emergentes que pueden incidir en su equilibrio funcional.

Entre estos factores abióticos emergentes, los nanomateriales —en particular, los nanotubos de carbono (NTC)— han cobrado relevancia debido a sus propiedades fisicoquímicas. Diversos estudios han reportado que los NTCPM pueden incrementar la resistencia y resiliencia del suelo (Yasmeen *et al*., 2024; Naskar *et al*., 2025), además de ser utilizados como vehículos eficientes para la liberación controlada de pesticidas (Wang *et al*., 2022) y fertilizantes en sistemas agrícolas (Schlogl *et al*., 2024). Sin embargo, su incorporación creciente al ambiente edáfico plantea interrogantes sobre su interacción con componentes críticos del suelo, incluyendo las enzimas. Dado su potencial para modificar la actividad microbiana y las propiedades fisicoquímicas del suelo, los NTC podrían alterar directa o indirectamente la dinámica de la actividad enzimática, con posibles repercusiones en los ciclos biogeoquímicos y la sostenibilidad del agroecosistema (Lin *et al*., 2022)

Por consiguiente, en el presente estudio se aplicaron distintas concentraciones de NTCPM a un Xerosol representativo de zonas áridas, en el cual se establecieron plantas de melón (*Cucumis melo* L.), con el objetivo de evaluar la respuesta enzimática asociada a la biomasa microbiana edáfica. Se presentan los resultados correspondientes a los muestreos realizados a los 15 y 30 días, con el fin de identificar respuestas tempranas y dinámicas iniciales en la actividad enzimática frente a la exposición a NTCPM.

MATERIALES Y MÉTODOS

El muestreo del suelo se realizó en el ejido La Hedionda de los Morales, perteneciente al municipio de General Cepeda en Coahuila de Zaragoza, México, con coordenadas 25° 33' 5" N; 101° 24' 9" O, y altitud de 1,194 msnm.

El experimento se llevó a cabo bajo un diseño por bloques completamente al azar. Se emplearon NTCPM con un diámetro externo en el rango de 20 a 54 nm, longitud entre 2 y 5 µm y compuestos por 24 capas. Según su caracterización morfológica, se observaron

depósitos parciales de nanopartículas de óxido de hierro en el interior de los nanotubos. La cantidad aplicada de NTCPM al Xerosol fue de 0, 5, 25, 50 y 100 mg kg^{-1} de suelo en macetas, correspondientes a los tratamientos T1, T2, T3, T4 y T5, respectivamente. Posteriormente, se realizó el trasplante de plántulas de melón y se suministró fertilización mediante una solución nutritiva tipo Steiner, aplicada cada tres días.

Del suelo se tomaron muestras a los 15 y 30 días, con base en Lorenz y Dick (2011). Posteriormente, se determinó la actividad fosfatasa alcalina utilizando p-nitrofenil fosfato (pNPP) como sustrato análogo del monoéster de ortofosfato; se midió el producto de la reacción mediante espectrofotómetro a 400 nm (Tabatabai y Bremner, 1969). La determinación de la actividad invertasa mediante la reacción con ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) se basa en la cuantificación de azúcares reductores, principalmente glucosa y fructosa, liberados por la acción de la enzima sobre la sacarosa. Se midió la mezcla de reacción por espectrofotometría UV-Vis a 540 nm (Frankenberger y Johanson 1983).

La actividad de la catalasa se determinó mediante el método de retro-titulación con $KMnO_4$ (Zhang *et al*., 2012). La actividad de la catalasa se expresó en mL 0.1M $KMnO_4$ g^{-1} de suelo 20 min^{-1}. La actividad deshidrogenasa se determinó siguiendo el método propuesto por Klein *et al*. (1971), que utiliza cloruro de 2,3,5-trifeniltetrazolio (TTC) como sustrato, generando 1,3,5-tripheniltetrazolio formazán (TPF) como producto de la reacción enzimática por deshidrogenasas del suelo. Se midió el formazán a 492 nm y los resultados se expresaron en µg de TPF g^{-1} de suelo 96 h^{-1}.

Todas las determinaciones espectrofotométricas se realizaron en un lector de microplaca (Biotek Instruments Inc., modelo Synergy H1, E.U.A.). Los análisis estadísticos se realizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), utilizando el software Statistica v.10 (StatSoft Inc., Tulsa, OK, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La actividad catalasa aumentó con la concentración de NTCPM (Cuadro 1). A los 15 días después de la aplicación (DDA), el tratamiento control (T1) presentó la menor actividad catalasa, lo que indica una baja capacidad de descomposición del H_2O_2, mientras que el tratamiento T5 mostró la mayor actividad. A los 30 DDA, la actividad catalasa en T5 fue **68 % mayor** que el control, considerando que **descompuso 68 % más H_2O_2** al requerir menos volumen de $KMnO_4$.

La actividad catalasa es ampliamente reconocida como un indicador de la calidad biológica del suelo debido a su estrecha relación con la actividad microbiana y la aireación del mismo (Türkay *et al*., 2024). En este sentido, la modificación de la actividad catalasa observada en los suelos tratados con NTCPM podría atribuirse a alteraciones en la microbiota edáfica y en los niveles de **H_2O_2**, considerando que este tipo de nanomateriales puede influir en los procesos redox y en la dinámica microbiana del suelo.

Cuadro 1. Efecto de los tratamientos de nanotubos de carbono de pared múltiple (NTCPM) en la actividad enzimática aplicados en un Xerosol, a los 15 y 30 días después de la aplicación (DDA).

T[℃]	Catalasa (mL 0.1M $KMnO_4$ g^{-1} 20 min^{-1})		Invertasa (mg glucosa g^{-1} 24 h^{-1})		Fosfatasa alcalina (µg $C_6H_5NO_3$ g^{-1} 24 h^{-1})		Deshidrogenasa (µg TPF g^{-1} 96 h^{-1})	
NTCPM	15 DDA	30 DDA	15 DDA	30 DDA	15 DDA	30 DDA	15 DDA	30 DDA
T1[ᵖ]	1.25 ± 0.04[d]	2.00 ± 0.09[d]	1.24 ± 0.01[ab]	1.49 ±0.04[b]	8.2 ± 1.5[a]	63.2 ± 4.1[b]	28.8 ± 3.1[b]	40.2 ± 1.1[c]
T2[ᵟ]	0.97 ± 0.02[c]	0.73 ± 0.02[c]	1.24 ± 0.02[ab]	1.50 ±0.07[b]	13.5 ± 1.2[ab]	91.0 ± 7.6[c]	24.8 ± 0.9[b]	24.6 ± 1.7[b]
T3[ᶠ]	0.8 ± 0.04[c]	0.43 ± 0.09[b]	1.20 ± 0.01[a]	1.30 ±0.02[a]	17.4 ± 0.5[b]	58.2 ± 8.9[b]	24.8 ± 1.0[b]	22.8 ± 0.7[b]
T4[Φ]	0.62 ± 0.05[b]	0.23 ± 0.05[ab]	1.32 ± 0.05[b]	1.24±0.01[a]	31.4 ± 0.6[c]	33.9 ± 2.2[a]	13.0 ± 2.0[a]	17.3 ± 0.3[a]
T5[ᴸ]	0.4 ± 0.07[a]	0.13 ± 0.06[a]	1.23 ± 0.01[ab]	1.22±0.01[a]	40.4 ± 4.5[d]	26.2 ± 2.0[a]	12.6 ± 3.7[a]	16.4 ± 0.7[a]

[℃] Tratamientos. [ᵖ]T1: testigo sin NTCPM; [ᵟ]T2: 5 mg kg^{-1} NTCPM; [ᶠ]T3: 10 mg kg^{-1} NTCPM; [Φ]T4: 50 mg kg^{-1} NTCPM; [ᴸ]T5: 100 mg kg^{-1} NTCPM. Diferentes superíndices en la misma columna sugieren diferencias significativas de acuerdo a Tukey para $\rho \leq 0.05$.

La actividad invertasa fue estadísticamente igual entre todos los tratamientos a los 15 DDA, con valores de 1.20–1.32 mg glucosa g^{-1} 24 h^{-1}. Sin embargo, a los 30 DDA, se observó una disminución generalizada para las mayores concentraciones de NTCPM (25, 50 y 100 mg kg^{-1} de suelo), donde los tratamientos T1 y T2 fueron estadísticamente iguales. Wang *et al*. (2022) reportaron que la actividad invertasa se inhibe al añadir NTCPM en concentraciones a partir de 10 mg kg^{-1} de suelo en conjunto con la presencia de microplásticos. Esto podría ser causado por la presencia de dos factores inductores de alteraciones en el sistema redox de los microorganismos del suelo. En la presente investigación, a diferencia de otras enzimas, la invertasa no presentó un patrón claro de inhibición a corto plazo, lo que sugiere una posible inhibición tardía o adaptación microbiana diferenciada frente a los NTCPM.

La actividad fosfatasa alcalina incrementó con la dosis de NTCPM a los 15 DDA, registrando el valor más bajo en T1 y el más alto en T5. Sin embargo, a los 30 DDA, la mayor actividad se observó en T2, mientras que T5 disminuyó hasta 58.5%, con respecto al control. Se ha reportado anteriormente que los NTCPM mejoran el crecimiento radicular y modifican el microbioma de la rizosfera (Hao *et al*., 2023), lo que se traduce en mayor exudación de fosfatasas. Lo anterior sugiere un efecto de estimulación inicial de la actividad fosfatasa relacionado a la concentración aplicada de NTCPM, seguido de estabilización o inhibición con exposición prolongada y a altas concentraciones.

La actividad deshidrogenasa fue inhibida a mayor concentración de NTCPM. A los 15 DDA, el testigo registró la mayor actividad (28.8 µg TPF g^{-1} 96 h^{-1}), pero no hubo diferencias significativas entre T2 y T3. De igual manera, entre T4 y T5 esta tendencia fue similar, pero se puede destacar que sí existe mayor inhibición de la actividad deshidrogenasa entre las concentraciones de 25 y 50 mg kg^{-1} de suelo. Yasmeen *et al*. (2024), reportaron que los NTCPM incrementan la resistencia térmica de las

deshidrogenasas, pero su resiliencia se ve comprometida a partir de 100 mg de NTCPM kg^{-1} de suelo, posiblemente por efectos de inmovilización o toxicidad indirecta sobre las comunidades microbianas responsables de su síntesis y regulación.

CONCLUSIONES

La aplicación de NTCPM en un Xerosol cultivado con melón modificó la actividad enzimática del suelo e incrementó la actividad catalasa y fosfatasa alcalina en concentraciones entre 25 y 50 mg de NTCPM kg^{-1} de suelo, mientras que la deshidrogenasa fue inhibida a mayores concentraciones, sugiriendo posibles efectos de toxicidad o inmovilización en los microorganismos del Xerosol. De acuerdo con los resultados, se observa que los NTCPM afectan diferencialmente la actividad enzimática del Xerosol, por lo que futuras investigaciones deberán evaluar su impacto a largo plazo y determinar concentraciones seguras para su aplicación agrícola.

AGRADECIMIENTOS

Al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav) por el apoyo otorgado para realizar esta investigación y al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) por facilitar el acceso a sus instalaciones y equipos.

BIBLIOGRAFÍA

Díaz, F. J., Sanchez-Hernandez, J. C. & Notario, J. S. (2021). Effects of irrigation management on arid soils enzyme activities. *Journal of Arid Environments,* 185, 104330.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1988). Revised legend: FAO/UNESCO Soil Map of the World. FAO.

Frankenberger, W. T., Jr., & Johanson, J. B. (1983). Method of measuring invertase activity in soils. *Plant and Soil,* 74(2), 301–311.

González Medrano, F. (2012). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. ISBN 978-607-7908-69-2.

Hao, Y., Yu, Y., Sun, G., Gong, X., Jiang, Y., Lv, G., Zhang, Y., Li, L., Zhao, Y., Gu, W. & Qian, C. (2023). Effects of multi-walled carbon nanotubes and nano-silica on root development, leaf photosynthesis, active oxygen and nitrogen metabolism in maize. *Plants,* 12(8), 1604.

Klein, D. A., Loh, T. C. & Goulding, R. L. (1971). A rapid procedure to evaluate the dehydrogenase activity of soils low in organic matter. *Soil Biology and Biochemistry*, 3(4), 385-387.

Lin, J., Ma, K., Chen, H., Chen, Z., & Xing, B. (2022). Influence of different types of nanomaterials on soil enzyme activity: A global meta-analysis. Nano Today, 42, 101345.

Lorenz, N., & Dick, R. P. (2011). Sampling and pretreatment of soil before enzyme analysis. En R. P. Dick (Ed.), Methods of soil enzymology (Vol. 9, pp. 49–58). Soil Science Society of America.

Naskar, J., Kumar Jha, A., Singh, T. N., & Aeron, S. (2025). Climate change and soil resilience: a critical appraisal on innovative techniques for sustainable ground improvement and ecosystem protection. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste,* 29(4), 03125002.

Patel, N., Oudemans, P. V., Hillman, B. I., & Kobayashi, D. Y. (2013). Use of the tetrazolium salt MTT to measure cell viability effects of the bacterial antagonist Lysobacter enzymogenes on the filamentous fungus Cryphonectria parasitica. *Antonie Van Leeuwenhoek,* 103, 1271-1280.

Schlogl, A. E., de Sousa, M. S., de Oliveira, A. M., Santos, I. J. B., & de Oliveira Junior, E. N. (2024). Carbon nanotubes fertilizers: properties and applications. In Nanofertilizer Synthesis (pp. 233-246). Elsevier.

Tabatabai, M. A. & Bremner, J. M. 1969. Use of pnitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry,* 1:301-307.

Türkay, F. Ş. H., Durmuş, M., & Yakupoğlu, T. Exploring Catalase Activity as A Biological Indicator in Degraded Soils. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi,* 39(2), 401-417.

Wang, Q., Feng, X., Liu, Y., Cui, W., Sun, Y., Zhang, S., & Wang, F. (2022). Effects of microplastics and carbon nanotubes on soil geochemical properties and bacterial communities. *Journal of Hazardous Materials,* 433, 128826.

Yasmeen, S., Mandal, N., Ganguly, P., Kumar, S., & Rakshit, R. (2024). Resistance and resilience of soil biological indicators: A case study with multi-walled carbon nanotube. *Pedosphere,* 34(3), 664-675.

Zuccarini, P., Sardans, J., Asensio, L., & Peñuelas, J. (2023). Altered activities of extracellular soil enzymes by the interacting global environmental changes. *Global change biology,* 29(8), 2067-2091.

APLICACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE ZNO EN LA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE SUSTRATOS CULTIVADOS CON PEPINO Y LECHUGA

Steffany Sánchez Portillo[1]; Dana Valentina Fajardo Menchaca[1]; Hipólito Hernández Hernández[2]; Ranjita Saikia[3]; Fabián Pérez Labrada[1]

[1] Departamento de Botánica, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. C.P. 25030, Saltillo, México.
[2] Instituto de Agroingeniería, Universidad del Papaloapan. C.P. 68400, Oaxaca, México.
[3] Bio-Nano Material Science and Engineering, Asian Institute of Technology. Z.C. 12120, Pathum Thani, Thailand.

Correo del autor de correspondencia: fabian.perezl@uaaan.edu.mx

RESUMEN

Los suelos y sustratos son entornos con gran cantidad de interacciones bioquímicas y procesos enzimáticos, particularmente las enzimas se asocian con la transformación de materia orgánica y disponibilidad de nutrientes. Existe poca información sobre la respuesta de las enzimas al uso de nanofertilizantes. El objetivo de esta investigación fue evaluar el impacto de la aplicación drench de nanopartículas ZnO (NPs-ZnO) en la actividad enzimática del sustrato cultivado con pepino y lechuga. Se evaluó la actividad fosfatasa ácida**,** β-glucosidasa, β-N-acetilglucosaminidasa, ureasa e hidrólisis de fluoresceína de diacetato además del pH, conductividad eléctrica y potencial óxido-reducción. Las ZnO-NPs no impactan negativamente la actividad enzimática y los parámetros químicos del sustrato ($p < 0.05$). El uso de nanopartículas de ZnO puede ser una alternativa en la nutrición de cultivos sin impactar la actividad enzimática del sustrato; sin embargo, la respuesta depende de la dosis usada.

PALABRAS CLAVE: *Fosfatasa ácida***,** *β-glucosidasa, β-N-acetilglucosaminidasa, ureasa, fluorescein diacetato.*

INTRODUCCIÓN

Los suelos y sustratos son entornos con una intrincada red de procesos bioquímicos y enzimáticos. Algunas enzimas como la ureasa, fosfatasa y β-glucosidasa, entre otras, se involucran en el ciclaje de nutrientes (Chettri *et al*., 2021). En peat moss las enzimas deshidrogenasa, β-glucosidasa, fosfatasa ácida, arilsulfatasa y ureasa presentan mayor actividad (Sedia y Ehrenfeld, 2006). Recientemente se sugiere que la actividad enzimática y la carga microbiológica (actividad fluorescein diacetato) son un indicador del estado ecológico y potencial productivo del suelo y sustrato (Naz *et al*., 2022).

Plantas bajo sustrato demandan altas tasas de fertilización, por ello la nanotecnología surge como una alternativa, particularmente las nanopartículas (NPs). Por sus características, las NPs tienen la capacidad de liberar nutrientes de forma controlada; las más utilizadas son las NPs metálicas de óxido de zinc (NPs-ZnO), óxido de hierro (NPs-Fe_3O_4) u óxido de cobre (NPs-CuO) (Lv *et al*., 2023). Aplicaciones de NPs-ZnO y NPs-

Fe_3O_4 en dosis bajas parecen estimular la ureasa y la β-glucosidasa, promoviendo procesos de mineralización de nitrógeno y transformación de P (Li *et al*., 2017). Sin embargo, su impacto en la actividad enzimática depende de la concentración, tipo de NPs, tiempo de exposición y comunidad microbiana presente (Lv *et al*., 2023).

El creciente interés de la actividad enzimática como indicador de la salud del suelo (Daunoras *et al*., 2024) y la incertidumbre del impacto de las NPs aplicadas vía drench (Jarzynska *et al*., 2025) plantean un desafío en la producción sostenible de alimentos. Por esta razón, el objetivo de esta investigación fue verificar el impacto de las NPs-ZnO en la actividad enzimática y características químicas del sustrato. Este conocimiento puede servir como punto de partida para un manejo racional de las NPs aplicadas vía drench en la producción de alimentos bajo sustratos.

MATERIALES Y MÉTODOS

De manera independiente se desarrollaron dos cultivos: lechuga (variedad Patrona) y pepino (variedad Centauro F1) durante agosto de 2024 a enero de 2025, respectivamente. La lechuga se desarrolló por 50 días después del trasplante y el pepino durante 90 días desde la siembra directa. Las plantas se cultivaron en contenedores de polietileno negro con 6 L de mezcla perlita-peat moss (1:1, *v/v*). Los cultivos se desarrollaron bajo invernadero tipo capilla (25–27 °C, 60–70% de humedad relativa) ubicado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. La fertilización se aplicó vía fertirriego usando solución nutritiva Steiner (Steiner, 1961) a pH 6.3 y CE de 2.0 dS/m; en lechuga se aplicó desde el transplante y en pepino 15 días después de la emergencia y hasta el final del experimento. Los micronutrientes se adicionaron con quelato Ultrasol® micro Rexene®, aplicando 0.005 mM de Zn.

Los tratamientos estudiados fueron NPs-ZnO a razón de 50 mg/L (NPs-ZnO-B) y 250 mg/L (NPs-ZnO-A), una forma iónica de $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ a 3.3 mg/L (Zn-Iónico) y un tratamiento control (agua desionizada). Las NPs-ZnO eran de tipo hexagonal Wurtzita de 50 nm (Investigación y Desarrollo de Nanomateriales, S.A. de C.V.). Los tratamientos se aplicaron entre las 11:00 y las 13:00 h. La primera aplicación en lechuga se realizó durante la etapa BBCH-13 y en pepino durante la fase BBCH-103. Posteriormente se realizaron dos aplicaciones a intervalos de 15 días; aplicando un total de 60 mL por tratamiento/maceta: 10 mL en la primera aplicación, 20 mL en la segunda aplicación y 30 mL en la tercera aplicación.

Al final del ciclo de cultivo se determinó la actividad enzimática. Para ello se tomó 1 g de muestra del sustrato a 3 cm de profundidad, se eliminó el exceso de humedad durante 30 min y se almacenó a 4 °C. Se cuantificó la actividad enzimática fosfatasa ácida (FA) (Tabatabai y Bremner, 1969), β-glucosidasa (βG) (Eivazi y Tabatabai, 1988), β-N-acetylglucosaminidase (βNG) (Parham y Deng 2000), ureasa (U) (Zhang *et al*., 2011) e hidrolisis de fluoresceína de diacetato (FDA) (Adam y Duncan, 2001). Además, se cuantificó pH, conductividad eléctrica (CE, dS/m; Hanna HI 98130) y potencial oxido-reducción (Eh, mV; HM Digital, Inc. CA USA) en una proporción 1:5 de sustrato: agua desionizada.

En invernadero los cultivos se establecieron en bloques completos al azar; cada tratamiento contó con tres repeticiones (tres unidades experimentales por repetición). Los datos se sometieron a supuestos de normalidad y análisis de varianza seguido de prueba de medias Diferencia Mínima Significativa de Fisher ($p < 0.05$) InfoStat (v2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Actividad enzimática en sustrato de pepino. En el Cuadro 1 se aprecia el comportamiento de las enzimas en sustrato. La FA incrementó 81.5% bajo Zn-Iónico comparada con el control, la dosis alta de NPs-ZnO (250 mg/L) redujo 44.4% la actividad de esta enzima. Altas concentraciones de NPs-ZnO pudieron inducir estrés oxidativo inhibiendo esta enzima (Fortis-Hernández et al., 2024). βG presentó baja actividad bajo el tratamiento NPs-ZnO-B y Zn-Iónico; 51% menos respecto del control. Por su parte, βNG no presentó diferencia, demostrando que no se ve afectada negativamente la actividad de esta enzima con aplicación de NPs-ZnO. En el caso de U se documentó una disminución del 36% con ZnO-NPs-A respecto al control, esto se asocia a principios de inhibición en la actividad microbiana por la aplicación de NPs. En el caso de FDA no se presentaron diferencias significativas, lo que demuestra que las NPs no impactan negativamente la carga microbiológica.

Cuadro 1. Actividad enzimática asociada a sustratos con aplicación de nanopartículas de ZnO.

Tratamiento	Sustrato de pepino					Sustrato de lechuga				
	FA	βG	βNG	U	FDA	FA	βG	βNG	U	FDA
Zn-Iónico	701.03^{b}	113.97^{a}	2914.28^{a}	1.02^{a}	275.37^{a}	33.36^{a}	1956.92^{a}	6533.96^{a}	2.26^{a}	299.34^{a}
NPs-ZnO-B	695.90^{b}	121.20^{a}	3072.56^{a}	1.01^{a}	282.72^{a}	28.22^{a}	1958.64^{a}	8047.89^{ab}	2.51^{a}	222.20^{a}
NPs-ZnO-A	172.03^{ab}	1353.50^{ab}	4786.34^{ab}	1.18^{ab}	288.01^{a}	316.42^{b}	2120.36^{a}	8591.53^{b}	2.38^{a}	152.90^{a}
Control	38.49^{a}	1451.13^{ab}	5164.54^{b}	1.86^{b}	158.67^{b}	33.36^{a}	1962.08^{a}	6719.76^{a}	2.97^{b}	179.73^{a}
p valor	*0.0098*	*0.0315*	*0.0349*	*0.0382*	*0.368*	*0.0169*	*0.4746*	*0.0484*	*0.1108*	*0.7213*

FA=Fosfatasa ácida (µg p-nitrofenol g^{-1} suelo h^{-1}); βG=β-glucosidasa (µg nitrofenol g^{-1} suelo seco h^{-1}); βNG=β-N-acetilglucosaminidasa (µg de p-nitrofenol g^{-1} suelo h^{-1}); U=ureasa (NH_4^+-N g^{-1} suelo h^{-1}); FDA= hidrólisis de fluoresceína de diacetato (µg de fluoresceína liberada g^{-1} suelo). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Actividad enzimática en sustrato de pepino. La actividad enzimática del sustrato de lechuga se observa en la Tabla 1. FA fue mayor al aplicar ZnO-NPs-A reduciendo su actividad con ZnO-NPs-B, esto puede deberse a que al disminuir la concentración de Zn se redujo el efecto estimulante. La aplicación de ZnO-NPs (A y B) incrementó la actividad βNG, reduciendo un 20% al aplicar tratamiento iónico. En el caso de U el tratamiento ZnO-NPs-A no difirió estadísticamente del control, indicando que su aplicación no afectó negativamente la actividad de esta enzima. Se sugiere que la enzima βNG alcanza óptima actividad a pH=7.7, pero en este estudio se documentó una elevada actividad a pH=5.9. Tanto U como βNG no son afectadas por aglomeración sedimentaria ocasionada por la acidez del medio y la obstrucción en los poros del sustrato.

Parámetros químicos del sustrato. En el Cuadro 2 se presenta el impacto de las NPs-ZnO en las variables químicas (pH, CE y Eh) en sustratos de lechuga y pepino. Al aplicar Zn-iónico, el pH del sustrato de pepino se redujo 22% respecto del control, probablemente porque el Zn tiende a liberarse más rápidamente en soluciones de pH ácido (< 7) (Wang *et al.*, 2020). En el sustrato de pepino, la aplicación de NPs-Zn-A indujo un comportamiento similar al control en la CE mientras que en el resto de tratamientos decreció. Mientras que en la lechuga Zn-Iónico incrementó un 67.95% la CE respecto de NPs-ZnO-B. Este fenómeno podría deberse a la capacidad de la lechuga de absorber en mayor medida metaloides por su alta tasa de transpiración. En el caso del Eh del sustrato de pepino mostró un ambiente oxidado con la aplicación de Zn.

Cuadro 2. Impacto de las formas y concentraciones de Fe y Zn en variables químicas de sustrato.

Tratamiento	Sustrato pepino			Sustrato lechuga		
	pH	CE (dS/m)	Eh (mv)	pH	CE (dS/m)	Eh (mV)
Zn-Iónico	4.66^{a}	0.59^{a}	159.33^{b}	6.13^{c}	0.78^{c}	168.33^{a}
NPs-ZnO-B	5.38^{b}	0.50^{a}	153.33^{b}	5.32^{a-c}	0.25^{a}	184.00^{ab}
NPs-ZnO-A	5.63^{b}	0.72^{ab}	154.67^{b}	4.96^{ab}	0.41^{ab}	198.67^{b-d}
Control	5.90^{b}	0.90^{bc}	158.67^{b}	5.50^{bc}	0.46^{bc}	217.33^{d}
p valor	*0.0423*	*0.0045*	*0.368*	*0.0472*	*0.0447*	*0.0025*

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

CONCLUSIONES

Las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) no afectan negativamente la actividad enzimática del sustrato. Sin embargo, la actividad de las enzimas, así como como la carga microbiológica (fluorescein diacetato) responden a las dosis aplicadas. Cabe resaltar que la actividad de las enzimas β-glucosidasa, β-N-acetylglucosaminidasa y ureasa no se ve afectada negativamente por la forma. La información aquí presentada permite considerar las nanopartículas como una alternativa para la producción de cultivos sin afectar la salud del sustrato.

AGRADECIMIENTOS

SSP agradece el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México para estudios de posgrado y al Laboratorio Nacional CONACyT de Ecofisiología Vegetal y Seguridad Alimentaria - Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, por las instalaciones y equipos necesarios para llevar a cabo el experimento.

BIBLIOGRAFÍA

Adam, G. & Duncan, H. (2001). Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biology and Biochemistry*, *33*(7–8), 943–951. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00244-3.

Chettri, D., Sharma, B., Verma, A. K., & Verma, A. K. (2021). Significance of Microbial Enzyme Activities in Agriculture. *Microbiological Activity for Soil and Plant Health Management*, 351–373. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2922-8_15.

Daunoras, J., Kačergius, A. & Gudiukaitė, R. (2024). Role of Soil Microbiota Enzymes in Soil Health and Activity Changes Depending on Climate Change and the Type of Soil Ecosystem. *Biology 2024, Vol. 13, Page 85*, *13*(2), 85. https://doi.org/10.3390/BIOLOGY13020085.

Eivazi, F. & Tabatabai, M. A. (1988). Glucosidases and galactosidases in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, *20*(5), 601–606. https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90141-1.

Fortis-Hernández, M., Pivaral-Chávez, A. G., Galindo-Guzmán, A. P., Preciado-Rangel, P., Ruiz-Ortega, F. J., Trejo-Valencia, R. (2024). Nanopartículas de óxido de zinc para incrementar rendimiento, compuestos bioactivos y actividad enzimática en lechuga. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *11*(1). https://doi.org/10.19136/ERA.A11N1.3939.

Jarzynska, K., Ciura, K., Gao, X. J., Mikolajczyk, A., Gao, X. & Puzyn, T. (2025). Understanding the zeta potential of nanomaterials through predictive nanoinformatics. In *Nano Today* (Vol. 64). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.nantod.2025.102783.

Li, B., Chen, Y., Liang, W. Zhen, Mu, L., Bridges, W. C., Jacobson, A. R. & Darnault, C. J. G. (2017). Influence of cerium oxide nanoparticles on the soil enzyme activities in a soil-grass microcosm system. *Geoderma*, *299*, 54–62. https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2017.03.027.

Lv, Z., Zhong, M., Zhou, Q., Li, Z., Sun, H., Bai, J., Liu, J. & Mao, H. (2023). Nutrient strengthening of winter wheat by foliar ZnO and Fe3O4 NPs: Food safety, quality, elemental distribution and effects on soil bacteria. *Science of The Total Environment*, *893*, 164866. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.164866.

Naz, M., Dai, Z., Hussain, S., Tariq, M., Danish, S., Khan, I. U., Qi, S. & Du, D. (2022). The soil pH and heavy metals revealed their impact on soil microbial community. *Journal of Environmental Management*, *321*, 115770. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115770.

Parham, J. A. & Deng, S. P. (2000). Detection, quantification and characterization of β-glucosaminidase activity in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, *32*(8–9), 1183–1190. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00034-1.

Sedia, E. G. & Ehrenfeld, J. G. (2006). Differential effects of lichens and mosses on soil enzyme activity and litter decomposition. *Biology and Fertility of Soils*, *43*(2), 177–189. https://doi.org/10.1007/S00374-006-0077-6.

Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, *15*(2), 134–154. https://doi.org/10.1007/BF01347224.

Tabatabai, M. A. & Bremner, J. M. (1969). Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry*, *1*(4), 301–307. https://doi.org/10.1016/0038-0717(69)90012-1.

Wang, X., Sun, T., Zhu, H., Han, T., Wang, J. & Dai, H. (2020). Roles of pH, cation valence, and ionic strength in the stability and aggregation behavior of zinc oxide nanoparticles. *Journal of Environmental Management*, *267*, 110656. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.110656.

Zhang, C., Liu, G., Xue, S. & Song, Z. (2011). Rhizosphere soil microbial activity under different vegetation types on the Loess Plateau, China. *Geoderma*, *161*(3–4), 115–125. https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2010.12.003.

ENCAPSULACIÓN DE UREA E INHIBIDOR BIOLÓGICO DE LA NITRIFICACIÓN CON ALGINATO

Berenice Avendaño Morales[1]; Claudia Hidalgo Moreno[1]; Julián Delgadillo Martínez[1]; Alejandro Alarcón[1]; Maribel Jiménez Fernández[2]

[1] Colegio de Postgraduados. Montecillo 56264, Texcoco, Estado de México, México.
[2] Centro de Investigación y Desarrollo en Alimentos, Universidad Veracruzana, Industrial Ánimas 91190, Xalapa-Enríquez, Veracruz. México.

Correo del autor de correspondencia: avendano.berenice@colpos.mx

RESUMEN

El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados provoca impactos ambientales, por lo que se proponen alternativas como la encapsulación de urea y el uso de inhibidores biológicos de la nitrificación. En este estudio se evaluó la encapsulación de urea y ácido linoleico (inhibidor biológico) en matrices de alginato de sodio, incluyendo una formulación con orina esterilizada como fuente alternativa de nitrógeno. Las esferas obtenidas (1.2–2.5 mm) mostraron porcentajes de encapsulación de ácido linoleico de 7% y 10.4%, y de nitrógeno de 6.0% y 4.5% en las formulaciones N-inhibidor y E-orina, respectivamente. Presentaron buena fluidez, baja cohesión y superficies rugosas con microgrietas asociadas al ácido linoleico. Estos resultados evidencian que las matrices de alginato permiten una encapsulación eficaz de compuestos activos, favoreciendo un manejo más eficiente y sustentable del nitrógeno en agricultura.

PALABRAS CLAVE: *Ácido linoleico; esferas de alginato; fertilizantes nitrogenados.*

INTRODUCCIÓN

El uso intensivo de fertilizantes nitrogenados en la agricultura ha contribuido al aumento de la productividad de los cultivos, pero también ha ocasionado pérdidas significativas de nitrógeno en el ambiente provocando la contaminación hídrica y atmosférica (Velthof y Rietra, 2018; Galloway *et al*., 2004). Entre las estrategias propuestas para incrementar la eficiencia en el uso del nitrógeno destaca la aplicación de inhibidores de la nitrificación, los cuales retardan la conversión de amonio (NH_4^+) a nitrato (NO_3^-) actuando sobre la enzima amoníaco monooxigenasa (AMO) e hidroxilamina oxidorreductasa (HAO), enzimas involucradas en el proceso. Esto resulta en una menor pérdida de NO_3^- y emisiones de óxidos de nitrógeno (NxO) (Subbarao *et al*., 2006). Inhibidores sintéticos de la nitrificación, como la nitrapirina, han demostrado efectividad, sin embargo, su uso prolongado representa un riesgo potencial para el ambiente, por lo que se han buscado alternativas biológicas más sostenibles, como el ácido linoleico, cuyo efecto inhibitorio sobre las enzimas AMO, HAO y ureasa ha sido reportado en diversos estudios (Subbarao *et al*., 2006a, 2008).

La encapsulación de compuestos activos con polímeros naturales como el alginato representa una estrategia adicional para mejorar la liberación controlada y la estabilidad

de sustancias susceptibles a la degradación, como la urea o los inhibidores biológicos. La técnica de coacervación permite la formación de microesferas a partir de la interacción entre polisacáridos aniónicos y cationes divalentes (Fernández *et al*., 2015), generando estructuras capaces de proteger los ingredientes activos y liberarlos de forma gradual. Esta tecnología puede contribuir a una fertilización más eficiente y con menor impacto ambiental.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la encapsulación de urea y ácido linoleico en esferas de alginato de sodio como una alternativa para mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno en suelos agrícolas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se usaron esferas de alginato (ALG) con urea (U) y ácido linoleico (AL) en proporción ALG:U:AL (p/p): 1:1:0.3, 1:1:0.5, 1:1:1, 1:1:1.5, 1:0.5:1.5, 1:0.25:1.5, 1:0.25:2. . Adicionalmente se prepararon otras esferas con orina esterilizada (120°C, 107 kPa, 20 min) en proporción ALG:U:AL (p/p) 1:1:0.3, ambas elaboradas por Avendaño y colaboradores (2023). Para la extracción del AL se empleó un equipo Soxhlet (Lab-Line 5000, Labline Instruments, India) y n-Hexano (Sigma-Aldrich, EUA). Se consideró la pureza del reactivo en el cálculo. El nitrógeno se cuantificó con equipo elemental FLASH 2000 (Thermo Scientific™, EUA).

A partir de la concentración de AL y N se calculó la Eficiencia de Encapsulación (EE), que es el porcentaje del compuesto activo que quedó dentro de la matriz, con la fórmula:

$$\% EE = \frac{g\ activo\ por\ 100\ g\ de\ sólidos\ (esferas)}{g\ activo\ por\ 100\ g\ de\ sólidos\ (emulsión)} \times 100$$

Se midió el tamaño de las esferas con un calibrador vernier (Truper®, México), la humedad se determinó siguiendo el método de la AOAC (2007). La densidad aparente y compactada se calcularon según Tomar *et al*. (2015). Se obtuvo el índice de Hausner (Hausner, 1967), la compresibilidad (Aulton y Wells, 1988), humectabilidad (Jinapong *et al*., 2007), solubilidad (Anema *et al*., 2006), higroscopicidad (Cai y Corke, 2000) y tiempo de disolución (El-Kamel *et al*., 2003). El análisis morfológico se realizó con recubrimiento metálico y observación en un microscopio electrónico de barrido (SEM) (JSM 6390, Jeol, Japón).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 1, presenta los porcentajes de N y ácido linoleico (AL) encapsulados en diferentes formulaciones basadas en ALG, U y el inhibidor de la nitrificación, así como su EE. Emplear orina en la relación 1:1:0.3 incrementó la EE del AL (23%), además de su encapsulación (10.4%), las esferas sin orina en la misma relación tuvieron 7% de AL con 16% de EE (Cuadro 1). La reducción de urea (de 1:1 a 1:0.5) con AL constante (1.5) aumentó la retención de N (de 1.7% a 2.2%) y su eficiencia de encapsulación (de 4.3% a 22.0%). La adición de AL en proporciones bajas (0.3) mejora la encapsulación de N (6%) y AL (16%), pero al aumentar su proporción (0.5 a 2) N disminuye notablemente (de 7.1%

a 2.4%). La presencia de orina en la formulación 1:1:0.3 incrementa la encapsulación de AL (10.4% vs. 7.0%), pero reduce la de N (4.5% vs. 6%).

Un estudio realizado por Evteev *et al*. (2018) reportó eficiencias de encapsulación superiores al 80% utilizando proporciones de alginato:lípidos de 1:0,5. Sin embargo, al aumentar la proporción de lípidos, la eficiencia disminuyó hasta un 30%. De manera similar, en el presente estudio se observó que una relación ALG:AL de 1:1,5 resultó contraproducente, lo que evidencia que un incremento en la cantidad del compuesto activo no necesariamente mejora la encapsulación si no se dispone de un soporte polimérico adecuado. Además, el ácido linoleico compite con la urea por los sitios de interacción en la matriz de alginato, reduciendo la eficiencia de encapsulación del nitrógeno a mayores concentraciones del inhibidor. Cuando la proporción de AL supera la capacidad de retención del alginato, el exceso de lípidos y de nitrógeno no se incorpora de manera eficiente en la matriz (Zilberboim *et al*., 1986).

Cuadro 1. Encapsulación de N, AL y eficiencia de encapsulación (EE) para diferentes proporciones de alginato:urea:ácido linoléico (ALG:U:AL)

ALG:U:AL	N (%)	AL, (%)	N, EE (%)	AL, EE (%)
1:1:0.3 (N-inhibidor)	6.0	7.0	6.0	16.0
1:1:0.3 con orina (E-orina)	4.5	10.4	5.0	23.0
1:1:0.5	7.1	0.8	10.7	5.1
1:1:1	3.8	1.3	7.6	3.8
1:1:1.5	1.7	3.1	4.3	6.4
1:0.5:1.5	1.5	1.0	7.5	1.6
1:0.25:1.5	2.2	0.8	22.0	1.0
1:0.25:2	2.4	1.1	8.3	1.0

La encapsulación de aceites en matrices poliméricas ha demostrado ser una estrategia efectiva para proteger compuestos lipofílicos. Chan *et al*. (2000) reportaron eficiencias superiores al 85% en aceite de germen de trigo y hasta 74.6% en aceite de prímula al incrementar la carga lipídica, aunque cargas excesivas favorecen lixiviación. Por otro lado, Ni *et al*. (2015) reportaron que microesferas elaboradas con alginato-quitosano alcanzaron EE > 60%. En contraste, sistemas basados únicamente en alginato, como los utilizados en el presente estudio, presentaron EE considerablemente menores (< 25%), probablemente debido a la menor afinidad del alginato por compuestos lipofílicos.

Las formulaciones E-orina y N-inhibidor fueron seleccionadas por sus altos porcentajes de encapsulación. El tamaño promedio de las esferas fue de 1.3–2.2 mm y 1.2–2.5 mm, respectivamente, valores comparables a los reportados para matrices de alginato (Van Elsas *et al*., 1992; Kulkarni *et al*., 2000). Las densidades aparentes fueron 0.598 $g \cdot mL^{-1}$ (E-orina) y 0.416 $g \cdot mL^{-1}$ (N-inhibidor), influenciadas por la porosidad y la naturaleza lipofílica del núcleo (Toprakçı *et al*., 2022). Ambas formulaciones presentaron alta

humedad (90–93%) y elevada higroscopicidad (82–97 g/100 g), atribuibles a la estructura hidrofílica del alginato (Schneider *et al.,* 2016; Jin *et al*., 2023).

La humectabilidad fue más rápida en N-inhibidor (2.21 s) que en E-orina (3.53 s), mientras que la solubilidad fue de 6.54% y 8.75%, con tiempos de disolución similares (≈4 h), adecuados para liberación prolongada. El índice de Hausner (< 1.2) y la compresibilidad (< 13%) indican buena fluidez y baja cohesión, evitando aglomeración. El análisis de la morfología superficial de las esferas con N-inhibidor mediante SEM reveló superficies rugosas con presencia de grietas y estructuras irregulares (Figura 1). Las micrografías obtenidas a diferentes aumentos (×30, ×33, ×100 y ×2000) mostraron pliegues cerosos en los bordes de las grietas, posiblemente relacionados con la presencia del ácido linoleico, el cual podría generar tensiones internas durante el proceso de secado o reticulación.

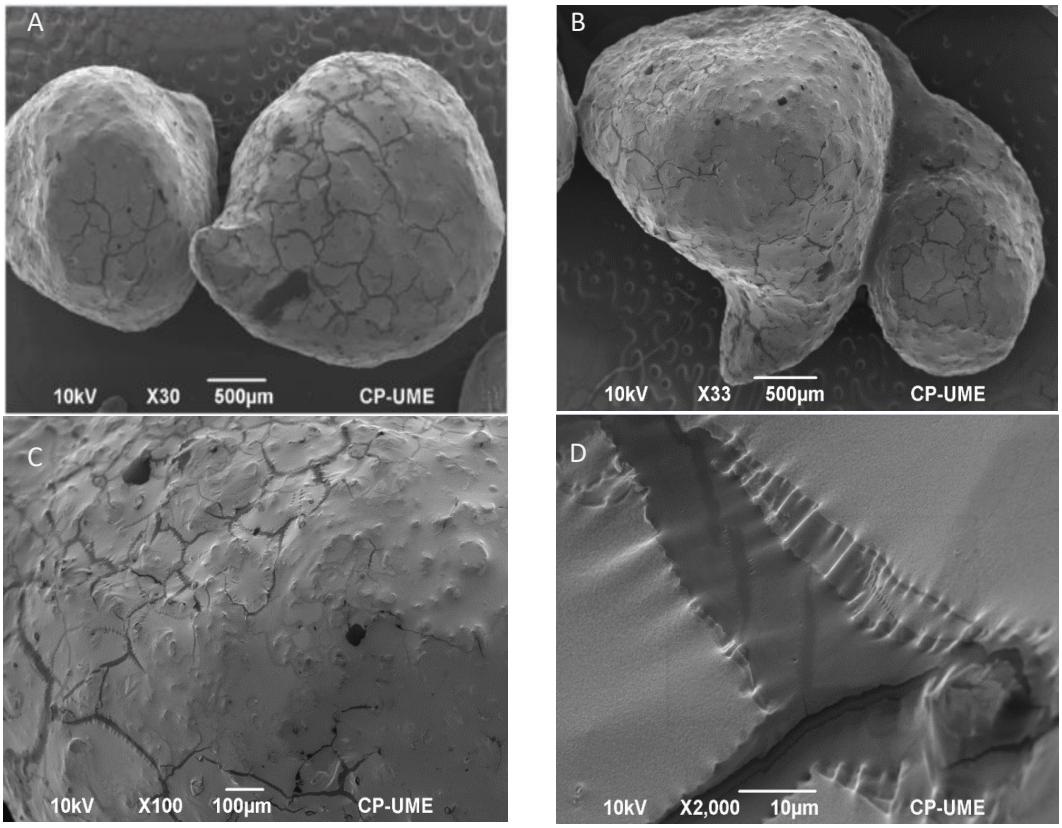


Figura 1. Micro morfología superficial de esferas con N-inhibidor observadas mediante SEM. A) ×30; B) ×33; C) ×100; D) ×2000.

Dichas grietas podrían facilitar la penetración de agua y acelerar la disolución del sistema, promoviendo una liberación controlada a través de mecanismos de erosión superficial. Estos resultados coinciden con lo reportado por otros autores que han observado defectos superficiales similares en matrices poliméricas cargadas con compuestos lipofílicos, lo cual puede influir positivamente en la cinética de liberación del activo (Rivera *et al*., 2015; Chan *et al*., 2000).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran que la encapsulación simultánea de urea y un inhibidor biológico de la nitrificación, como el ácido linoleico, en matrices de alginato de sodio permite modular la eficiencia de encapsulación. El uso de orina como fuente alternativa de nitrógeno incrementó la retención del inhibidor (AL) en las esferas E-orina. N-inhibidor presentó una estructura superficial rugosa con microgrietas, lo que sugiere un mecanismo de liberación por erosión superficial, facilitando así la difusión del compuesto activo. Ambas esferas mostraron buena fluidez, baja compresibilidad y tamaños adecuados para su aplicación en suelo, lo que las convierte en una alternativa viable y sustentable a los fertilizantes nitrogenados convencionales. Estos hallazgos respaldan el potencial de los sistemas alginato-urea-inhibidor como tecnologías para mejorar la eficiencia del uso del nitrógeno y reducir el impacto ambiental en sistemas agrícolas.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por otorgar la Cátedra (CAT2024-00017), la cual hizo posible parte de la realización de este trabajo. Se extiende un agradecimiento especial al equipo del Laboratorio de Fertilidad de Suelos y Química Ambiental y a la Unidad de Microscopía Electrónica del Colegio de Postgraduados.

BIBLIOGRAFÍA

Anema, S. G., Pinder, D. N., Hunter, R. J. & Hemar, Y. (2006). Effects of storage temperature on the solubility of milk protein concentrate (MPC85). *Food Hydrocolloids,* 20(3), 386–393. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.03.015.

Aulton, M. E., & Wells, T. I. (1988). Pharmaceutics: The science of dosage form design (pp. 247–248). Churchill Livingstone.

Avendaño-Morales, B., Hidalgo-Moreno, C., Delgadillo-Martínez, J., Alarcón, A. & Jiménez-Fernández, M. (2023). [Title missing]. *Modern Agricultural Science and Technology,* 9(1–6), 10–14. https://doi.org/10.15341/mast(2375-9402)/01.09.2023/003.

Cai, Y. Z. & Corke, H. (2000). Production and properties of spray-dried Amaranthus betacyanin pigments. *Journal of Food Science,* 65(7), 1248–1252. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb10273.x

Chan, L. W., Lim, L. T. & Heng, P. W. S. (2000). Microencapsulation of oils using sodium alginate. *Journal of Microencapsulation,* 17(6), 757–766.

El-Kamel, A. H., Al-Gohary, O. M. N. & Hosny, E. A. (2003). Alginate-diltiazem hydrochloride beads: Optimization of formulation factors, in vitro and in vivo availability. *Journal of Microencapsulation*, 20(2), 211–225. https://doi.org/10.3109/02652040309178063.

Evteev, A., Larionov, S., Larionova, O., Sergeeva, I., Gavrilova, N., et al. (2018). Analyses of lipids release from alginate capsules within the simulated gastrointestinal environment. The Annals of the University of Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI. *Food Technology,* 42(1), 123–136.

Fernández, B., Castro, C., & Eceiza, A. (2015). Obtención de fibras de alginato mediante hilado por coagulación con sulfatos de metales multivalentes. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales,* 35(2), 189–200. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522015000200005

Galloway, J. N., Dentener, F. J., Capone, D. G., et al. (2004). Nitrogen cycles: Past, present, and future. *Biogeochemistry,* 70, 153–226. https://doi.org/10.1007/s10533-004-0370-0.

Hausner, H. (1967). Friction conditions in a mass of metal powder. *International Journal of Powder Metallurgy,* 3, 7–13.

Jin, F., Liao, S., Li, W., Jiang, C., Wei, Q., Xia, X., & Wang, Q. (2023). Amphiphilic sodium alginate-polylysine hydrogel with high antibacterial efficiency in a wide pH range. *Carbohydrate Polymers,* 299, 120195. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.120195.

Jinapong, N., Suphantharika, M. & Jamnong, P. (2008). Production of instant soymilk powders by ultrafiltration, spray drying and fluidized bed agglomeration. *Journal of Food Engineering,* 84(2), 194–205. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.032.

Kulkarni, A. R., Soppimath, K. S., Aminabhavi, T. M., Dave, A. M. & Mehta, M. H. (2000). Glutaraldehyde crosslinked sodium alginate beads containing liquid pesticide for soil application. *Journal of Controlled Release,* 63(1–2), 97–105. https://doi.org/10.1016/S0168-3659(99)00176-5.

Rivera, M. C., Pinheiro, A. C., Bourbon, A. I., Cerqueira, M. A. & Vicente, A. A. (2015). Hollow chitosan/alginate nanocapsules for bioactive compound delivery. *Carbohydrate Polymers,* 117, 95–104.

Schneider, T. A., Deladino, L. & Zaritzky, N. (2016). Yerba mate (Ilex paraguariensis) waste and alginate as a matrix for the encapsulation of N fertilizer. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering,* 4(4), 2449–2458. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00344.

Subbarao, G. V., Ishikawa, T., Ito, O., et al. (2006). A bioluminescence assay to detect nitrification inhibitors released from plant roots: A case study with Brachiaria humidicola. *Plant and Soil*, 288, 101–112.

Subbarao, G. V., Ito, O., Sahrawat, K. L., Berry, W. L., Nakahara, K., Ishikawa, T., Watanabe, T., Suenaga, K., Rondon, M. & Rao, I. M. (2006a). Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems—Challenges and opportunities. *Critical Reviews in Plant Sciences,* 25(4), 303–335. https://doi.org/10.1080/07352680600794232.

Subbarao, G. V., Nakahara, K., Ishikawa, T., Yoshihashi, T., Ito, O., Ono, H., Ohnishi-Kameyama, M., Yoshida, M., Kawano, N., & Berry, W. L. (2008). Free fatty acids from the pasture grass Brachiaria humidicola and one of their methyl esters as inhibitors of nitrification. *Plant and Soil,* 313, 89–99. https://doi.org/10.1007/s11104-008-9682-5.

Tomar, M., Singh, A. K. & Sinha, A. R. (2015). Physicochemical parameter of microcrystalline cellulose and the most acceptability in pharmaceutical industries. *Journal of Innovations in Biological and Chemical Sciences,* 2, 570–578.

Toprakçı, İ., Torun, M. & Şahin, S. (2022). Development of an encapsulation method for trapping the active materials from sour cherry biowaste in alginate microcapsules. *Foods,* 12(1), 130. https://doi.org/10.3390/foods12010130.

Van Elsas, J. D., Trevors, J. T., Jain, D., Wolters, A. C., Heijnen, C. E., & van Overbeek, L. S. (1992). Survival of, and root colonization by, alginate-encapsulated Pseudomonas fluorescens cells following introduction into soil. *Biology and Fertility of Soils,* 14, 14–22. https://doi.org/10.1007/BF0033629.

Velthof, G. L., & Rietra, R. P. J. (2018). Nitrous oxide emission from agricultural soils. Wageningen Environmental Research report 2921-5. Wageningen Environmental Research.

Zilberboim, R., Kopelman, I. J. & Talmon, Y. (1986). Microencapsulation by a dehydrating liquid: Retention of paprika oleoresin and aromatic esters. *Journal of Food Science,* 51(5), 1301–1306.

MANUFACTURA Y CARACTERIZACIÓN DE HIDROCARBÓN PROVENIENTE DE RESIDUOS TEQUILEROS: UNA ALTERNATIVA SOSTENIBLE PARA EL MEJORAMIENTO DE SUELOS AGRÍCOLAS

Edgar Vázquez Núñez[1]; Verónica del Ángel Hernández[2]

[1] Grupo de Investigación sobre Aplicaciones Nano y Biotecnológicas para la Sostenibilidad (NanoBioTS), LaSAE, División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Campus León, León, Guanajuato, México, 37150.

[2] Materials Innovation Factory, Department of Chemistry, University of Liverpool, Liverpool, 51 Oxford Street, Liverpool, L7 3NY, United Kingdom

Correo del autor de correspondencia: edgar.vazquez@ugto.mx/ed.vazquezn@gmail.com

RESUMEN

La industria tequilera genera cantidades importantes de residuos con alto contenido de materia orgánica, como el bagazo de agave y las vinazas, cuya disposición inadecuada representa un serio problema ambiental. Este trabajo tuvo como objetivo manufacturar y caracterizar hidrocarbón obtenido mediante carbonización hidrotermal empleando estos residuos, analizando el efecto del pretratamiento con ácido fosfórico sobre sus propiedades fisicoquímicas y morfológicas. Se produjeron dos materiales: uno tratado con ácido fosfórico (HCA) y otro empleando agua destilada (HC). Los hidrocarbones fueron caracterizados mediante pruebas de análisis elemental, FTIR, DRX, área superficial BET, contenido de macroelementos y microscopía electrónica de barrido (SEM). Se observó que el tratamiento ácido incrementó el contenido de fósforo total y de otros nutrientes esenciales como potasio, calcio y magnesio. El HCA mostró mayor capacidad de retención de agua (CRA), menor contenido de cenizas y un área superficial superior a la del HC. Los espectros FTIR mostraron la presencia de grupos fosfato en el HCA, mientras que el análisis DRX mostró la presencia de fases cristalinas asociadas al fósforo. Estas modificaciones estructurales y composicionales sugieren una mayor funcionalización del material y su uso potencial para la liberación gradual de nutrientes. Esta propuesta es relevante ya que promueve la circularización en procesos agroindustriales y alienta a la revalorización de residuos tequileros para el mejoramiento sostenible del suelo agrícola.

PALABRAS CLAVE: *Circularización; material carbonoso; mejoradores de suelo; revalorización de residuos; sostenibilidad agrícola.*

INTRODUCCIÓN

La industria tequilera mexicana produce grandes volúmenes de residuos orgánicos, principalmente bagazo de agave y vinazas, cuya mala disposición plantea riesgos ambientales importantes (Alemán-Nava *et al.*, 2018). Estos subproductos, ricos en carga orgánica, representan una oportunidad para su valorización mediante tecnologías sostenibles de conversión. La carbonización hidrotermal (CHT) ha demostrado ser una alternativa eficiente, asequible y sostenible para el aprovechamiento de estos residuos

con alto contenido de humedad, facilitando su conversión directa en materiales carbonosos sin necesidad de adecuaciones, como el presecado, operando a temperaturas moderadas (150–350 °C) bajo condiciones acuosas y presión manejable (Cavali *et al., 2023)*.

La CHT ha sido aplicada con éxito a diferentes biomasas residuales, produciendo hidrocarbones con propiedades únicas que los posicionan como mejoradores de suelo prometedores para la recuperación de suelos agrícolas degradados. En comparación con la pirólisis convencional, la CHT ofrece ventajas energéticas y operativas relevantes, generando productos con alta capacidad para mejorar la estructura del suelo, incrementar la retención de humedad y favorecer la disponibilidad de nutrientes (González-Arias *et al*., 2022).

Se ha demostrado que el uso de materiales carbonosos en suelos agrícolas puede tener efectos positivos sobre el rendimiento de cultivos como frijol, cacahuate y plátano (Sun *et al*., 2022). Particularmente, el hidrocarbón se diferencia del biocarbón debido a que conserva fracciones de carbono más lábiles, induciendo una mayor actividad microbiana, aunque también puede inmovilizar nitrógeno si se aplica en exceso. Además, la modificación química del hidrocarbón empleando ácidos, por ejemplo, fosfórico, ha incrementado la presencia de grupos funcionales en la superficie del material, aumentando su potencial para emplearse como fertilizante orgánico mineral (Khosravi *et al*., 2024).

En este trabajo se propone la manufactura de hidrocarbón a partir de la mezcla de bagazo de *Agave tequilana* F.A.C. Weber y vinazas, provenientes de la producción de tequila, a través de procesos de carbonización hidrotermal. Se evaluó la adición de ácido fosfórico sobre las características y propiedades del material.

MATERIALES Y MÉTODOS

Manufactura del hidrocarbón. Los materiales se prepararon mezclando bagazo de *A. tequilana* F.A.C. Weber, vinazas y, en el caso del hidricarbón ácido, ácido fosfórico (H_3PO_4) concentrado en una proporción de 10% v/p. La mezcla se transfirió a un reactor hidrotermal de Teflón® con revestimiento de acero inoxidable y capacidad máxima de 50 mL. El reactor se colocó en una mufla a 350 ± 10 °C durante 13 horas. Al finalizar, el reactor se enfrió a temperatura ambiental.

El hidrocarbón se separó por filtración al vacío, se lavó con agua destilada hasta alcanzar un pH constante y se secó en un horno a 80 °C hasta obtener peso constante. El material se trituró y tamizó utilizando una malla de 2 mm.

Caracterización elemental y composicional. El análisis se realizó empleando un analizador CHNS (Fisons EA 1108, EE. UU.), determinando los contenidos de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) directamente; el oxígeno se calculó por diferencia, considerando la fracción de cenizas y la suma total de CHNS (Fadeeva *et al*., 2008). Se determinaron las propiedades proximales del HC y HCA, la humedad, las cenizas y la materia volátil, de acuerdo con el método ASTM D1762 (Aller *et al*., 2017).

Caracterización química y funcional. El pH fue determinado de acuerdo con lo reportado en el método EPA 9045D. La identificación de los grupos funcionales se hizo

empleando FTIR en un espectrofotómetro Perkin Elmer Spectrum Two UATR (USA según lo reportado por Bento *et al.* (2019). Los espectros se evaluaron en un rango de 4,000–400 cm^{-1} con 10 escaneos por muestra.

Determinación de macroelementos. El contenido de P^{3-}, K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} y Fe^{3+} se hizo mediante digestión ácida siguiendo el método EPA 3050B reportado por Mihajlović *et al.* (2025).

Análisis estructural. La caracterización estructural se hizo a través de difracción de rayos X (XRD) con un equipo Panalytical Empyrean (radiación CuKα; λ = 0.1506 nm).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Morfología. En la Figura 1 se muestran las micrografías en donde se revelan materiales con estructura heterogénea, identificando partículas con forma irregular, fragmentos de fibras y superficies rugosas. En la imagen a) correspondiente al HC, pueden observarse estructuras alargadas con baja porosidad, pertenecientes a restos lignocelulósicos parcialmente carbonizados, indicando carbonización limitada, dada la ausencia del ácido.

En las micrografías del HCA b) se distinguieron superficies rugosas y la presencia de estructuras amorfas y con alta porosidad, infiriendo que este material posee un área superficial elevada. Esta morfología se desea dado que se ha reportado que favorece la adsorción y liberación de agua y nutrientes, promoviendo la actividad de poblaciones microbiana edáficas (Khosravi *et al.*, 2024). Fregolente *et al.* (2021) reportaron que estas estructuras superficiales facilitan la interacción con partículas coloidales y compuestos orgánicos del suelo, mejorando su CIC.

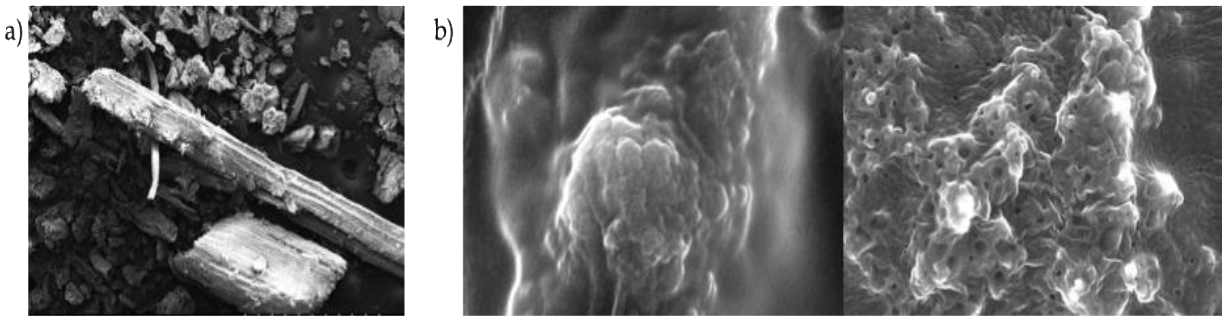


Figura 1. Micrografías de los materiales obtenidos: a) HC y b) HCA.

Caracterización fisicoquímica del material. En el Cuadro 1 se muestran los resultados, donde se observa que el HCA incrementó el contenido de fósforo total comparado con el HC (24.83%, 47.13% respectivamente). Este resultado es favorable dado que el fósforo es un macronutriente esencial para el desarrollo de la planta y normalmente se encuentra de forma no disponible en el suelo (Kleinman *et al.*, 2022). La adición de fósforo durante la síntesis del hidrocarbón produce materiales que favorecen su liberación gradual, haciéndolo más disponible para los cultivos y reemplazando a los fertilizantes sintéticos. Los contenidos de C_t, N_t, O K, Ca y Mg aumentaron significativamente. El incremento de oxígeno está relacionado con la presencia de grupos funcionales oxigenados como consecuencia de la adición del H_3PO_4 (Zhang *et al.*, 2021).

Respecto a la CRA, los materiales mostraron un desempeño similar aceptable, siendo esto un aspecto crucial dado que facilita su uso potencial ante las sequías. El contenido de cenizas se redujo de 14.09% para el HC a 10.29% para el HCA, indicando el aumento en la fracción de la materia orgánica activa (Liu *et al.,* 2023). El HCA reportó un pH de 4.6, lo que es importante considerar para ajustarse según el tipo de suelo al que se planeé aplicar.

Cuadro 1. Propiedades fisicoquímicas y elementales de los materiales carbonosos.

Parámetro	HC	HCA
Capacidad de Retención de Agua (CRA) (%)	28.79	30.2
Humedad (%)	1.30	1.80
Material volátil (%)	75.81	77.46
Cenizas (%)	14.09	10.29
pH	7.2	4.6
Conductividad eléctrica (CE)	519.3	242.7
C_t	56.8	62.92
H	2.76	2.83
N_t	2.91	3.45
S_t	0.22	0.24
O	24.78	47.23
P_t	24.83	47.13
K	21.37	28.96
Ca	17.28	22.35
Mg	27.74	28.94
Fe	2.05	2.12

Determinación de área superficial (BET). La adición de ácido fosfórico impactó positivamente sobre el área superficial del material. El valor de área superficial HC fue bajo (0.1859±0.0610 m^2/g) mientras que el HCA alcanzó un valor significativamente mayor *i.e.*, 3.4279 ± 0.1114 m^2/g, siendo esto un aumento de 18 veces.

Este incremento se atribuyó a la acción desestructurizante y generadora de poros del ácido fosfórico durante la hidrólisis térmica; el ácido eliminó compuestos volátiles y favoreció la formación de micro y mesoporos, modificando la estructura interna del material (El Hadrami *et al.*, 2022).

FTIR y DRX de los materiales manufacturados. Se identificaron diferencias importantes en los materiales obtenidos (HC, HCA). En ambos (Figura 2b) se observaron señales características de grupos OH (3,200—3,600 cm^{-1}), carboxilo (2,900—3,000 cm^{-1}) y de anillos aromáticos (1,600—2,000 cm^{-1}) con distinta intensidad y definición. La banda correspondiente a grupos OH fue más tenue en el HCA, sugiriendo mayor condensación estructural y la transformación de este grupo a otras especies funcionales más estables. De igual manera, el HCA presentó señales mejor definidas en la región aromática y bandas alrededor de 600-400 cm^{-1} que se asocian a grupos fosfato (PO_4^{3-}), ausentes en el hidrocarbón manufacturado solo con agua (Wang *et al.*, 2022).

En la Figura 2b se presentan los difractogramas donde puede verse una banda ancha entre los 20 y 22 ^{o} 2θ para ambas muestras, muy común en materiales con carbonización parcial (Escudero-Curiel *et al.*, 2023). En el patrón de HCA se identificaron picos con

mayor intensidad y definición a partir de 25º 2θ, indicando un mayor grado de orden estructural debido a la presencia de fases critalinas inducidas por el ácido, tales como fosfatos metálicos, posiblemente de Ca^{2+}, K^{+} o Mg^{2+}, que pudieran actuar como fuentes de liberación controlada de nutrientes en el suelo (Ge *et al.*, 2024).
Puede asumirse que el trátamiento ácido facilitó la reestructuración del material y la incorporación de especies minerales en la matriz carbonosa.

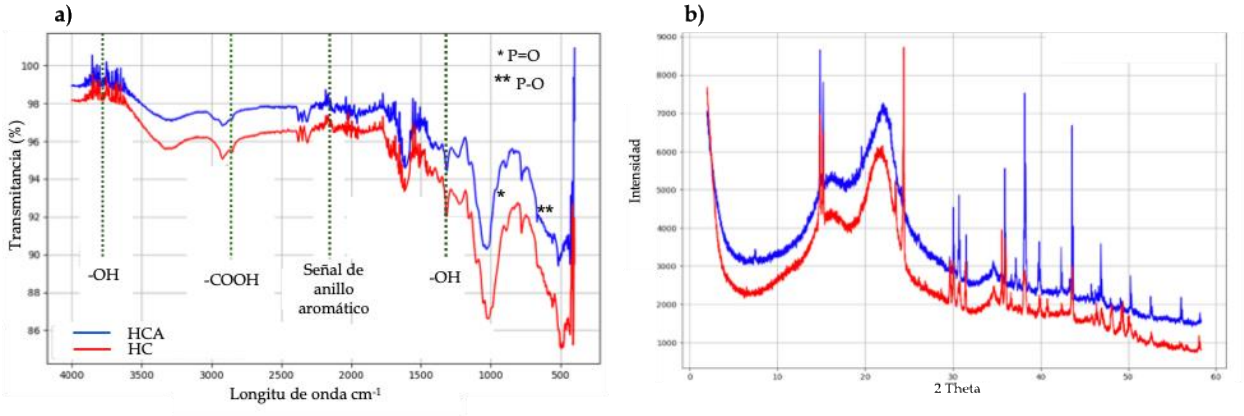


Figura 2. Espectros a) FTIR y b) DRX de los materiales manufacturados.

CONCLUSIONES

La transformación de residuos tequileros mediante carbonización hidrotermal resultó efectiva para producir hidrocarbones con alto potencial agronómico. El tratamiento con ácido fosfórico mejoró significativamente la composición elemental y el contenido de nutrientes, así como la incorporación de grupos funcionales en la superficie del material, y aumentó importantemente el área específica. La presencia de grupos fosfato y de fases cristalinas sugiere un mecanismo que permitiría la liberación lenta de nutrientes, haciéndolo ideal para su aplicación como mejoradores de suelos agrícolas.

Con esta propuesta se contribuye al cierre de ciclos de nutrientes y se promueve la recircularización en procesos de la agroindustria, ofreciendo una alternativa sostenible y asequible para la revalorización de subproductos en la producción de tequila, con impacto directo en la salud y productividad del suelo.

BIBLIOGRAFÍA

Alemán-Nava GS, Gatti IA, Parra-Saldivar R., Dallemand, J.F., Rittmann, B.E. & Iqbal, H. (2018). Biotechnological revalorization of Tequila waste and by-product streams for cleaner production–A review from bio-refinery perspective. *J. Cleaner Prod.*, 172:3713–3720. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.134.

Aller, D., Bakshi, S., Laird, D.A. (2017). Modified method for proximate analysis of biochars. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 124:335–342. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.01.012.

Bento, L.R., Castro, A.J.R., Moreira, A.B., Pastor, O., Bisinoti, M. & Almeida, C. (2019). Release of nutrients and organic carbon in different soil types from hydrochar obtained using sugarcane bagasse and vinasse. *Geoderma*, 334:24–32. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.034.

Cavali, M., Libardi, N., de Sena J.D., Woiciechowski, A., Sccol, C., Belli, P., Bayard, R., Benbelkacem, H. & de Castilhos, A. (2023). A review on hydrothermal carbonization of potential biomass wastes, characterization and

environmental applications of hydrochar, and biorefinery perspectives of the process. *Sci. Total Environ.*, 857:159627. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159627.

El Hadrami, A., Ojala, S. & Brahmi, R. (2022). Production of activated carbon with tunable porosity and surface chemistry via chemical activation of hydrochar with phosphoric acid under oxidizing atmosphere. *Surf. Interfaces*, 30:101849. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.101849.

Escudero-Curiel, S., Giráldez, A., Pazos, M. & Sanromán, Á. (2023). From waste to resource: valorization of lignocellulosic agri-food residues through engineered hydrochar and biochar for environmental and clean energy applications—a comprehensive review. *Foods*, 12:3646. https://doi.org/10.3390/foods12193646.

Fadeeva, V., Tikhova V. & Nikulicheva, O. (2008) Elemental analysis of organic compounds with the use of automated CHNS analyzers. *J. Anal. Chem.*, 63:1094–1106. https://doi.org/10.1134/S1061934808110142.

Fregolente, L.G., dos Santos, J.V., Mazzati, F.S., Miguel, T., Miguel, E., Moreira, A., Ferreira, O. & Bisioniti, M. (2021) Hydrochar from sugarcane industry by-products: assessment of its potential use as a soil conditioner by germination and growth of maize. *Chem. Biol. Technol. Agric.*, 8:1–13. https://doi.org/10.1186/s40538-021-00210-1.

Ge, Q., Dong, C., Wang, G., Zang, J. & Hou, R. (2024) Production, characterization and environmental remediation application of emerging phosphorus-rich biochar/hydrochar: a comprehensive review. *RSC adv.*, 14:33649–33665. DOI: 10.1039/D4RA03333G.

González-Arias, J., Sánchez, M.E., Cara-Jiménez. J., Baena-Moreno, F. & Zang, Z. (2022). Hydrothermal carbonization of biomass and waste: A review. *Environ. Chem. Lett.*, 1–11. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01311-x.

Khosravi, A., Yuan, Y., Liu, Q., Zeng, Hashemi, M., Tang, Y. & Xing, B. (2024) Hydrochars as slow-release phosphorus fertilizers for enhancing corn and soybean growth in an agricultural soil. *Carbon Res.*, 3:7. https://doi.org/10.1007/s44246-023-00086-w.

Kleinman, P.J., Osmond, D.L., Christianson, L.E., Flaten, D., Ippolito, J.A., Jarvie, H., Kaye, J., King, K., Leytem, A., & McGrath, J. (2022) Addressing conservation practice limitations and trade-offs for reducing phosphorus loss from agricultural fields. *Agric. Environ. Lett.*, 7:e20084. https://doi.org/10.1002/ael2.20084.

Liu, H., Lyczko, N., Nzihou, A., Eskicioglu, C. (2023). Phosphorus extracted municipal sludge-derived hydrochar as a potential solid fuel: Effects of acidic leaching and combustion mechanism. *Chem. Eng. J.*, 473:145191. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145191.

Mihajlović, D., Srdić, S., Benka, P., Čereković, N., Ilić, P., Radanović, D. & Antić-Mladenović, S. (2025). Potentially toxic elements in the agricultural soils of northwestern Bosnia and Herzegovina: spatial and vertical distribution, origin and ecological risk. *Environ. Monit. Assess.*, 197:1–15. https://doi.org/10.1007/s10661-025-13758-4.

Sun, R., Zheng, H., Yin, S., Zang, X., You, X., Wu, H., Suo, F., Han, K., Cheng, Y., Zang, C. & Li, Y .(2022). Comparative study of pyrochar and hydrochar on peanut seedling growth in a coastal salt-affected soil of Yellow River Delta, China. *Scie. Total Environ.*, 833:155183. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155183.

Wang, C., Huang, S., Zhu, Y., Zhang, S. (2022). Comparative study on the characteristics of hydrothermal products from lignocellulosic wastes. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 161:105408. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105408.

Zhang, S., Sheng, K., Yan, W., Liu, J., Shuang, E., Yang, M., Zhang, X. (2021). Bamboo derived hydrochar microspheres fabricated by acid-assisted hydrothermal carbonization. *Chemosphere*, 263:128093. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128093.

PLATAFORMA DE MONITOREO DE HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE IoT

Gloria Virginia Cano García[1]; Yael Abraham González Muñoz[2]; Juan Alfredo Salazar Cano[2]; Maritza Pescador Rivera[2]

[1] Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México – Texcoco Chapingo, CP 56230, Texcoco, Estado de México, México.
[2] Universidad Nacional Rosario Castellanos, San Eleuterio, Pedregal de Sta. Úrsula CP 04600, Coyoacán, Ciudad de México, México.

Correo del autor de correspondencia: gcanog@chapingo.mx

RESUMEN

La presente propuesta describe el desarrollo de una plataforma de monitoreo de humedad basada en tecnología de internet de las cosas (IoT) con la finalidad de proporcionar una herramienta de medición remota, en tiempo real, que permita a los usuarios obtener datos confiables sin intervención manual constante. El objetivo fue construir una solución escalable, autónoma y de bajo costo que permita medir la humedad del suelo a diferentes profundidades. Se propone la utilización de sensores conectados a unidades de procesamiento, con comunicación inalámbrica de radiofrecuencia hacia una estación base, la cual transmite los datos a una interfaz web mediante WiFi. La arquitectura incluye nodos de recolección de datos, una red de comunicación y un sistema de visualización en línea accesible desde cualquier navegador. Los datos son almacenados en la nube de AWS mediante una base de datos estructurada. Como resultado, se logró una solución robusta, confiable y adaptable a diferentes condiciones de campo en un rango de transmisión de más de cinco kilómetros en campo abierto. Esta herramienta representa un avance significativo en el monitoreo de precisión de la dinámica hídrica a fin de apoyar la toma de decisiones agronómicas basadas en datos.

PALABRAS CLAVE: *Internet de las cosas (IoT); monitoreo de humedad; plataforma inalámbrica; sensor de suelo.*

INTRODUCCIÓN

La actual crisis hídrica es uno de los problemas globales más acuciantes. La variabilidad del ciclo del agua ha aumentado debido al cambio climático. En consecuencia, numerosas regiones del mundo se enfrentan actualmente a sequías severas y breves períodos de precipitaciones extremas, lo que amenaza la supervivencia de la población, el desarrollo socioeconómico, la seguridad alimentaria y la salud de los ecosistemas (Pacheco-Treviño y Manzano-Camarillo, 2024). Actualmente más de la mitad del territorio nacional enfrenta condiciones de sequía, provocando un desafío considerable para el sector agrícola. Si bien desde el punto de vista de la hidrología y la meteorología, la sequía se presenta cuando la precipitación es significativamente menor

que lo habitual, algunos autores la clasifican en cuatro tipos: sequía meteorológica, sequía hidrológica, sequía agrícola y sequía socioeconómica (Santacruz-De León *et al.*, 2022).

En este contexto, se pone en evidencia la urgente necesidad de transformar los esquemas actuales de manejo y monitoreo del recurso hídrico en el campo. Por lo que la adopción de tecnologías emergentes, como el Internet de las Cosas (IoT) permiten el desarrollo de plataformas de monitoreo autónomo, escalables y de bajo consumo energético que permita incrementar la eficiencia del uso del agua, mediante la recolección de datos en tiempo real para la detección de la dinámica de humedad. Esta información se convierte en un insumo esencial para poder abordar diversas necesidades del sector agrícola de acuerdo con el paradigma de la industria 4.0 (Tovar *et al.*, 2019), las cuales se han aplicado a soluciones se incluyen sistemas de monitoreo de cultivos, suelos e invernaderos con el fin de optimizar procesos productivos (Chamara *et al.*, 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se desarrolló en las áreas verdes de la Universidad Nacional Rosario Castellanos ubicada en la alcaldía Coyoacán. Las pruebas se llevaron a cabo durante el mes de mayo del presente año.

El sistema se distribuyó en dos niveles: nodo de recolección y nodo central. Cada nodo de recolección está compuesto por una unidad de procesamiento Arduino Uno a la cual están conectados tres sensores de humedad YL69 alimentados por una batería de 20 000 mAh.

La transmisión de datos se realizó mediante radiofrecuencia de largo alcance desde el nodo de recolección hacia el nodo central, el cual se encargó de recibir, decodificar y transmitir los datos a un servidor web mediante wifi. En el servidor, una API (Application Programming Interface) en Python se encargó de recibir las peticiones y almacenar los datos en una base de datos estructurada en la nube de AWS (Amazon Web Services), y habilitar la consulta desde una interfaz gráfica tipo dashboard accesible desde cualquier navegador (Figura 1).

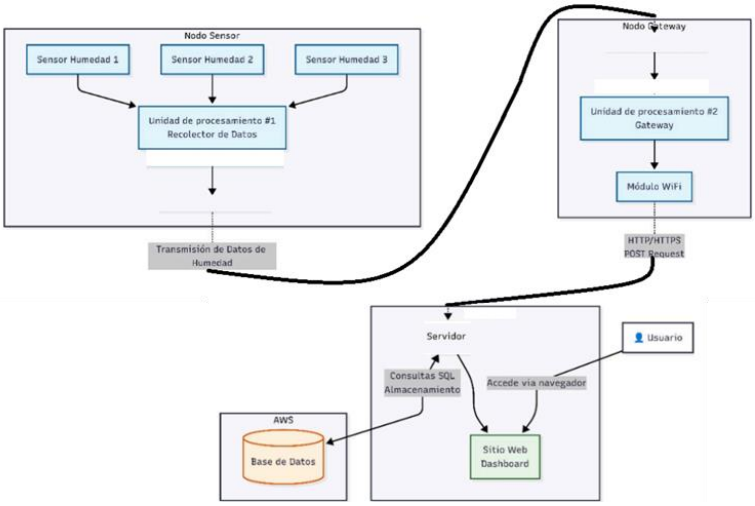


Figura 1. Esquema general del sistema de monitoreo de humedad, desde el nodo sensor hasta el almacenamiento y visualización de datos en la nube.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el periodo de evaluación (Figura 2), la transmisión de datos de humedad se realizó sin registrar pérdida de paquetes de información, lo que confirma la estabilidad del sistema de comunicación. Cuando algún sensor pierde la comunicación, esta condición se detecta de forma inmediata en la plataforma, ya que el registro de datos aparece en cero, permitiendo identificar rápidamente fallos en el enlace y tomar acciones correctivas.

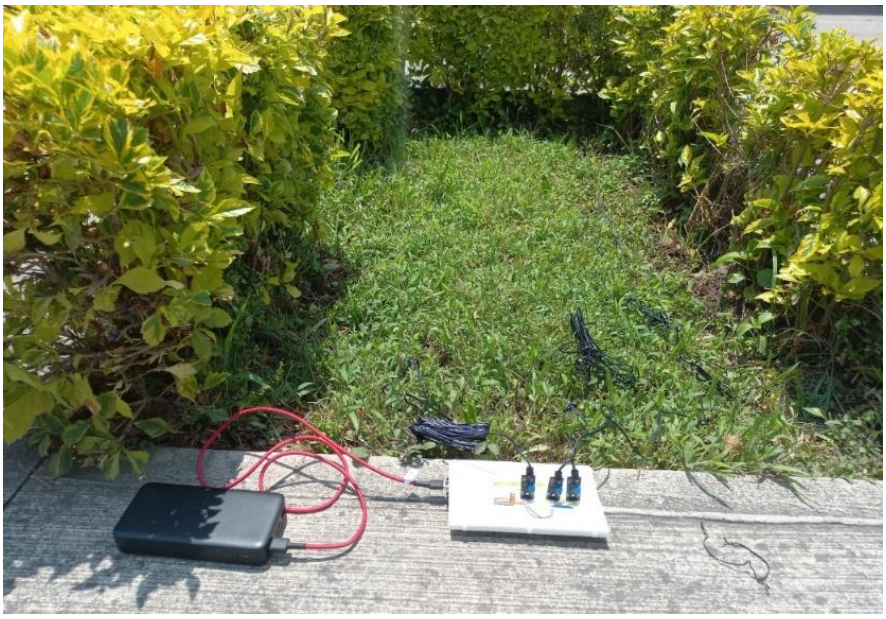


Figura 2. Sensores alimentados por una batería de 20 000 mAh.

Los datos generados por los sensores (Figura 3) fueron almacenados automáticamente en una base de datos en la nube (AWS) y presentados en tiempo real a través de un panel de control accesible en cualquier navegador web, lo cual permite facilitar la toma de decisiones informadas para la gestión hídrica. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Tovar et al. (2019) y Chamara *et al.* (2022), quienes destacan la importancia del Internet de las Cosas (IoT) para la optimización del recurso hídrico y la mejora de la productividad agrícola.

Una ventaja significativa frente a métodos tradicionales es que la recolección de datos no requiere intervención manual, eliminando la necesidad de mediciones en campo con libretas o equipos portátiles, lo cual reduce errores humanos, agiliza la disponibilidad de información y permite que los datos estén siempre actualizados para su análisis en tiempo real.

Finalmente, la integración con servicios en la nube no solo centraliza el almacenamiento de la información, sino que abre la posibilidad de implementar modelos predictivos basados en inteligencia artificial.

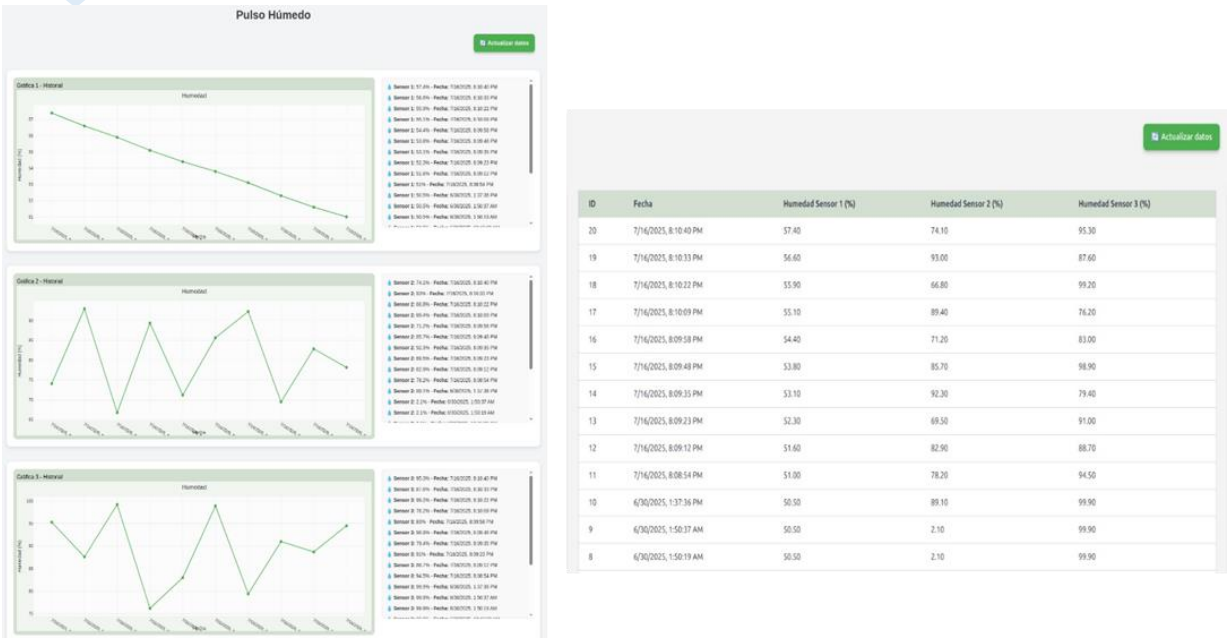


Figura 3. Interfaz gráfica de datos de humedad.

CONCLUSIONES

El sistema de monitoreo representa una alternativa funcional para la medición de humedad del suelo, demostrando ser una alternativa viable, escalable y eficiente para optimizar el manejo del recurso hídrico en parcelas agrícolas.

El sistema diseñado permitió la adquisición de datos en tiempo real a través de tres sensores, permitiendo la estructura modular de la arquitectura el incremento en el número de sensores, así como facilitar su replicabilidad y adaptación a otras regiones o condiciones agrícolas.

En conjunto, esta herramienta tecnológica representa un paso importante hacia una agricultura basada en datos, alineada con los principios de sostenibilidad y adaptación frente a escenarios de sequía y escasez de agua.

BIBLIOGRAFÍA

Chamara, N., Islam, D., Bai, F., Shi, Y. & GE, Y. (2022). *Ag-IoT for crop and environment monitoring: Past, present, and future.* Agricultural Systems, *203*: 103497. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X22001330.

Pacheco-Treviño, S., y M.G.F. Manzano-Camarillo. (2024). Revisión de las evaluaciones de escasez de agua: Aspectos destacados de la situación hídrica en México. *WIREs Agua* 11:e1721. https://doi.org/10.1002/wat2.1721.

Santacruz-De León, G., Moran-Ramírez, J. & y Ramos-Leal, J.A. (2022). Impacto de la sequía y la calidad del agua subterránea en la agricultura en una zona semiárida de México. *Agricultura,* 12(9):1379. https://doi.org/10.3390/agriculture12091379.

Tovar, J., Solórzano, D., Los, D.S., Badillo, A. & Rodríguez, G. (2019). Internet de las cosas aplicado a la agricultura: estado actual. *Lámpsakos, (22)*: 86–105. https://www.redalyc.org/journal/6139/613964509009/html/.

SÍNTESIS BIOGÉNICA Y CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS DE SELENIO COMO POSIBLE NANOFERTILIZANTE EN PLANTAS DE MAÍZ NATIVO (*Zea mays* L.)

Marycarmen Cortes Hernández[1]; Gabriela Medina Pérez[2]; Fabián Fernández Luqueño[3]

[1] Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 25900, Coahuila de Zaragoza, México.
[2]Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 43000, Tulancingo de Bravo, México.
[3] Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 07360, Ciudad de México, México.

Correo del autor de correspondencia: marycarmencohdz@cinvestav.mx

RESUMEN

En este estudio se sintetizaron nanopartículas de selenio (BIOSeNP) utilizando extracto de flores de cempasúchil (*Tagetes erecta* L.). Las flores se muestrearon y procesaron para obtener un extracto vegetal. La formación de las nanopartículas se confirmó por UV-Vis, con un pico de absorbancia a 257 nm, indicativo de selenio elemental. El análisis XPS reveló señales de C 1s y N 1s asociadas a compuestos orgánicos del extracto, así como la presencia de Se^0 y Se^{+4}. El difractograma de rayos X mostró planos con desplazamientos angulares para (100), (101), (110), (003) y (210), sugiriendo distorsiones cristalinas asociadas a biomoléculas. Las micrografías TEM evidenciaron morfología esférica con tamaños entre 10 y 100 nm. Estos resultados demuestran que la síntesis biogénica con extracto de flor de cempasúchil (*Tagetes erecta* L.) produce nanopartículas de selenio funcionalizadas y estables que le proveen mayor biodisponibilidad en sistemas agrícolas, sugiriendo su potencial aplicación como nanofertilizante para una agricultura más sustentable.

PALABRAS CLAVE: *Agricultura sostenible; Biofortificación*; *biosíntesis; nanoagricultura; nanotecnología; producción de alimentos.*

INTRODUCCIÓN

Los sistemas agroalimentarios enfrentan desafíos sin precedentes, derivados del cambio climático, la escasez de recursos y el uso ineficiente de agroquímicos, que deterioran las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo. Frente a este panorama, las nanopartículas surgen como una alternativa prometedora por su estabilidad, baja toxicidad y liberación controlada de nutrientes, lo que favorece una fertilización más eficiente y sostenible (Altammar, 2023). En particular, el selenio, aunque no es esencial para las plantas, puede mejorar sus funciones fisiológicas en dosis bajas y representa una opción viable para la biofortificación agronómica, dada su importancia nutricional para los seres humanos y su limitada disponibilidad en suelos y alimentos (Feinberg *et al.*, 2021). Si bien, el selenio no se ha identificado como un elemento esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas, este elemento puede mejorar las funciones

bioquímicas y fisiológicas de las plantas, representando una oportunidad para su uso en la biofortificación agronómica (Zohra *et al.*, 2021).

El maíz, alimento base en México y parte fundamental de la dieta global, enfrenta una producción deficitaria pese a la riqueza genética de las razas nativas del país. Ante la necesidad de mejorar su productividad y valor nutricional sin comprometer la salud del suelo, se plantea el uso de nanopartículas de selenio como nanofertilizante. Esta estrategia no solo podría mejorar el rendimiento y la calidad nutricional del cultivo, sino también fomentar una agricultura más sustentable, resiliente e innovadora mediante el uso de nanotecnología (Rehman *et al.*, 2022)

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal. Se muestrearon flores de cempasúchil (*Tagetes erecta* L.) en Tula de Allende (20°03′26″ N y 99°20′31″ O), Hidalgo, México. Se implementó un diseño de muestreo aleatorio estratificado en condiciones de campo abierto, en una superficie de 50 m^2, dividida en cinco estratos homogéneos. Se seleccionaron 20 plantas por estrato (total: 100 plantas), de las cuales se recolectaron dos flores completamente desarrolladas preferentemente del tercio medio superior, sin daños visibles ni insectos. Las flores se cortaron cuidadosamente desde el pedúnculo, se almacenaron en bolsas plásticas dentro de hieleras para su conservación y se trasladaron al laboratorio. Posteriormente, se lavaron con agua corriente y luego con agua desionizada y se dejaron secar a temperatura ambiente sobre papel absorbente durante 24 horas. Se separaron manualmente los pétalos del cáliz y las semillas, los pétalos fueron secados a 40 °C en estufa durante una hora, se trituraron y se tamizaron utilizando una malla número 200 para obtener un polvo fino, el cual fue almacenado en un frasco de vidrio ámbar a temperatura ambiente.

Reactivos. La sal de selenito de sodio (Na_2SeO_3) utilizada para la síntesis de las nanopartículas fue adquirida en Sigma-Aldrich (S5261) y como disolvente para preparar la sal precursora y el extracto vegetal se utilizó agua desionizada.

Preparación del extracto vegetal. Para la elaboración del extracto acuoso, se llevó a cabo la metodología descrita por Sheikhlou *et al.* (2020), con modificaciones. Se hirvieron dos gramos de polvo de flores de cempasúchil (*Tagetes erecta* L.) en 200 mL de agua desionizada durante cinco minutos, la solución resultante se dejó enfriar y se mantuvo en reposo durante 12 horas bajo agitación constante y en oscuridad. Finalmente, la solución se filtró utilizando papel Whatman número 1 y se conservó a 4 °C hasta su uso posterior.

Proceso de síntesis biogénica de nanopartículas de selenio (BIOSeNP). Para la síntesis de las BIOSeNP se siguió el método establecido por Sheikhlou *et al.* (2020), con modificaciones. Se preparó una solución de selenito de sodio (Na_2SeO_3) a una concentración de 10 mM, ajustando el pH a 6.0. A esta solución se añadió el extracto previamente obtenido, en una proporción 1:1 (v/v). La mezcla se mantuvo en agitación constante a 60 °C durante seis días, en condiciones de oscuridad. Transcurrido este periodo, se observó un cambió de color de amarillo claro a rojo ladrillo, lo cual indica la formación de nanopartículas de selenio. La suspensión se lavó con agua desionizada y se centrifugó a 10,000 rpm durante 20 minutos. El precipitado obtenido fue secado en una

estufa a 60 °C durante dos horas, y posteriormente se raspó para obtener un polvo fino, el cual fue almacenado en frascos de vidrio ámbar hasta su uso.

Caracterización de BIOSeNP. Las nanopartículas fueron caracterizadas por: a) Absorción del espectro UV-Vis, en un espectrofotómetro UV (THERMO SCIENTIFIC, modelo EVOLUTION 220) en un rango de longitud de onda de escaneo de 200 a 800 nm, con una velocidad de barrido de 1200 nm/min. b) Espectroscopía Foto electrónica de Rayos-X (XPS), a una profundidad máxima de 10 nm, para lo cual se utilizó un equipo marca Thermo Scientific, modelo K-Alpha, a una presión de 2.2×10^{-7} mbar en la cámara durante todo el análisis y una fuente de rayos X monocromática Al Kα (1486.68 eV) con un radio de análisis de 400 µm. c) Difracción de rayos X (DRX) por el método de polvos, un equipo de difracción de rayos X, RIGAKU (DMax-2100, en el rango de 2θ de 5-100°, con fuente de irradiación de Co Kα1 (λ=1.789010 Å), con detector curvo, 30 mA de corriente y un voltaje de 25 kV y d) Microscopía electrónica de transmisión (TEM), usando un microscopio electrónico de transmisión modelo JEM-1400 (JEOL Ltd), a 80 kV desde 50,000-100,000 aumentos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La formación preliminar de BIOSeNP se confirmó por UV-Vis, la cual presentó un pico de absorbancia a 257 nm (Figura 1a), característico de la resonancia plasmónica superficial. Este resultado indica la reducción de selenito de sodio a selenio elemental y la estabilización de las nanopartículas, en concordancia con lo reportado en estudios previos sobre nanopartículas de selenio (SeNP) cuyos picos de absorción se sitúan entre 257-260 nm (Hussain *et al.*, 2023). También se relacionó que el uso de extractos vegetales en la reducción de selenito de sodio (Na_2SeO_4) produce nanopartículas esféricas y estables (Alagesan y Venugopal, 2019).

El difractograma de rayos X (Figura 1b), reveló picos de menor intensidad y desplazamientos angulares en 2θ, correspondientes a los planos (100), (101), (110), (003) y (210) según la carta cristalográfica AMCSD-00122674. Estos cambios sugieren la presencia de fases adicionales o distorsiones cristianas, posiblemente causadas por biomoléculas producto incorporadas en la síntesis biogénica (Li *et al.*, 2024). La coexistencia de planos comunes confirma una base de selenio elemental (Sans-Serramitjana *et al.*, 2023).

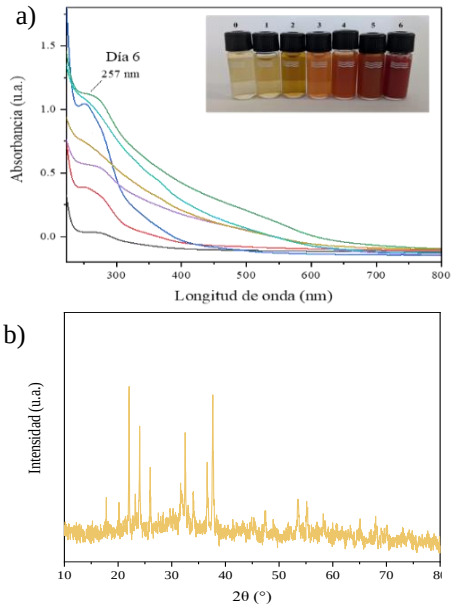


Figura 6. Análisis UV-Vis y Difracción de rayos X. a) Curvas de absorción UV-Vis y cambio de coloración de amarillo claro a rojo durante la síntesis de las BIOSeNP medidas del día 0 al 6; b) Difractograma DRX de las BIOSeNP sintetizadas.

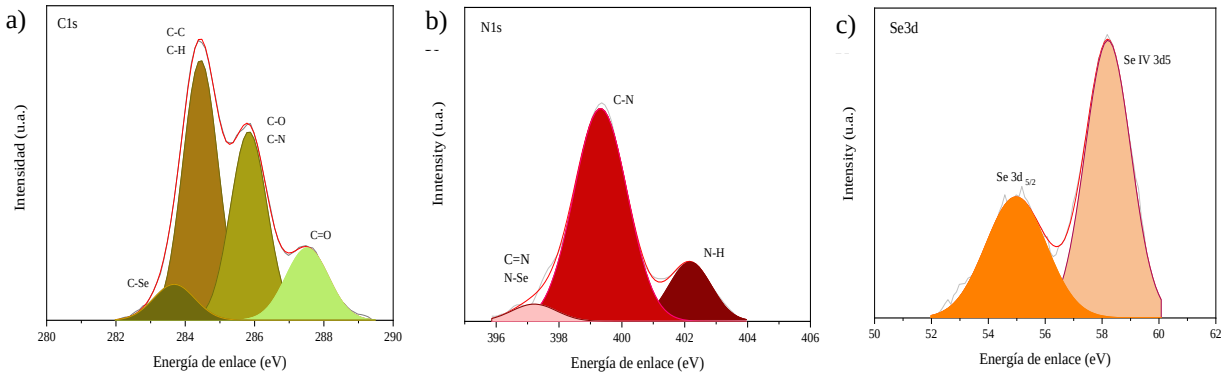


Figura 7. Espectros XPS de alta resolución. a) Espectro de la región del C 1s de BIOSeNP; b) Espectro de la región del N 1s de BIOSeNP; c) Espectro de la región del Se 3d de BIOSeNP.

El análisis por XPS, permitió estudiar la composición química superficial y los estados de oxidación presentes en las SeNP. En la región del C 1s (Figura 2a), se identificaron cuatro señales principales: 284.44 eV (moléculas como lípidos o aminoácidos de cadena ramificada), 285.83 y 287.52 eV, (grupos carboxilo y alcohol), relacionadas con residuos biológicos presentes en el extracto utilizado vegetal como compuestos fenólicos, ácidos orgánicos y proteínas (Zhang *et al.*, 2023). En la región N 1s (Figura 2b), se observaron tres picos: 397.21 eV, (especies de nitrógeno reducidas o interacciones con el núcleo de Se), 399.32 eV (aminas o amidas) y 402.17 eV (especies oxidadas, amonio cuaternario o nitratos), indicando la funcionalización con especies nitrogenadas del extracto. En la región del Se 3d (Figura 2c), se detectaron señales a 54.97 eV (Se $3d_{5/2}$) indicativo del selenio elemental (Se^0) y 58.21 eV (Se^{4+}), lo que sugiere la coexistencia de especies parcialmente reducidas, probablemente asociadas a la ruta de síntesis de los materiales, o factores pos síntesis (Pyrzynska, 2024).

Las micrografías TEM, revelaron que las BIOSeNP tienen una morfología esférica (Figura 3a), con tamaños de entre 10-100 nm (Figura 3b). El análisis EDS (Figura 3c) confirmó la presencia mayoritaria de Se en las partículas. (Alagesan yVenugopal, 2019).

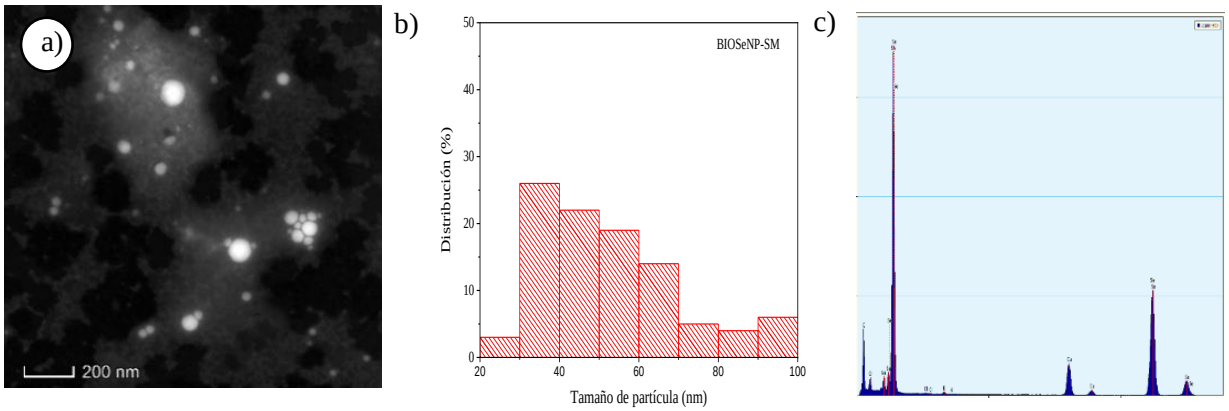


Figura 8. Análisis TEM de BIOSeNP-SM. a) Morfología de BIOSeNP-SM; b) Distribución de tamaño de partícula; c) Espectro de análisis elemental EDS de BIOSeNP-SM.

CONCLUSIONES

Las nanopartículas de selenio fueron sintetizadas exitosamente utilizando el extracto de flores de cempasúchil (*Tagetes erecta* L.), confirmándose su formación por espectroscopia UV-vis; el análisis por XPS reveló que los compuestos orgánicos del extracto actuaron como agentes reductores y estabilizantes. Las nanopartículas son de forma esférica y de estructura policristalina con base trigonal, de acuerdo con los análisis de DRX y TEM. Estas propiedades confirman la estabilidad y funcionalización superficial de las nanopartículas para su potencial uso en cultivos agrícolas; su tamaño nanométrico mejora la interacción y favorece su absorción en las células vegetales. Además, la coexistencia de selenio en sus formas reducidas sugiere una liberación gradual y más asimilable del selenio en el suelo, reduciendo los riesgos de toxicidad debido a que la presencia de este elemento podría influir sobre las funciones antioxidantes y de defensa en la planta para mejorar su crecimiento y protección contra el estrés. Estas características hacen a las BIOSeNP una alternativa prometedora como nanofertilizantes en cultivos de importancia como el maíz nativo y contribuyen al desarrollo sostenible al sustituir gradualmente a los fertilizantes convencionales.

BIBLIOGRAFÍA

Alagesan, V., & Venugopal, S. (2019). Green synthesis of selenium nanoparticle using leaves extract of *Withania somnifera* and its biological applications and photocatalytic activities. *Bionanoscience*, 9, 105-116.

Altammar, K. A. (2023). A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Frontiers in microbiology*, 14, 1155622.

Feinberg, A., Stenke, A., Peter, T., Hinckley, E.-L. S., Driscoll, C. T. & Winkel, L. H. (2021). Reductions in the deposition of sulfur and selenium to agricultural soils pose risk of future nutrient deficiencies. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 101.

Hussain, A., Lakhan, M. N., Hanan, A., Soomro, I. A., Ahmed, M., Bibi, F. & Zehra, I. (2023). Recent progress on green synthesis of selenium nanoparticles–a review. *Materials Today Sustainability*, 23, 100420.

Li, K., Li, J., Zhang, S., Zhang, J., Xu, Q., Xu, Z. & Guo, Y. (2024). Amorphous structure and crystal stability determine the bioavailability of selenium nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133287.

Pyrzynska, K. (2024). Plant Extracts for Production of Functionalized Selenium Nanoparticles. *Materials*, 17(15), 3748.

Rehman, A., Farooq, M., Lee, D.-J. & Siddique, K. H. (2022). Sustainable agricultural practices for food security and ecosystem services. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(56), 84076-84095.

Sans-Serramitjana, E., Gallardo-Benavente, C., Melo, F., Pérez-Donoso, J. M., Rumpel, C., Barra, P. J., Durán, P. & Mora, M. D. L. L. (2023). A comparative study of the synthesis and characterization of biogenic selenium nanoparticles by two contrasting endophytic selenobacteria. *Microorganisms*, 11(6), 1600.

Sheikhlou, K., Allahyari, S., Sabouri, S., Najian, Y. & Jafarizadeh-Malmiri, H. (2020). Walnut leaf extract-based green synthesis of selenium nanoparticles via microwave irradiation and their characteristics assessment. *Open Agriculture*, 5(1), 227-235.

Zhang, T., Qi, M., Wu, Q., Xiang, P., Tang, D. & Li, Q. (2023). Recent research progress on the synthesis and biological effects of selenium nanoparticles. *Frontiers in Nutrition*, 10, 1183487.

Zohra, E., Ikram, M., Omar, A. A., Hussain, M., Satti, S. H., Raja, N. I., Mashwani, Z.-U.-R. & Ehsan, M. (2021). Potential applications of biogenic selenium nanoparticles in alleviating biotic and abiotic stresses in plants: A comprehensive insight on the mechanistic approach and future perspectives. *Green Processing and Synthesis*, 10(1), 456-475.

EFECTO DE UN NANOCOMPOSITO EN LA GERMINACION Y DESARROLLO DE PLÁNTULAS DE MAÍZ

Luisa Valentina Tarango Lechuga[1]; César David Condori Chambi[2]; María Cecilia Valles Aragón[3]; César Guigón López[4]; Joan Sebastian Salas Leiva[2]; Guillermo Herrera Pérez[5]; María Antonia Lun Velasco[2]

[1]Escuela de Ingeniería, Tecnológico de Monterrey Campus Chihuahua, Av. H. Colegio Militar 4700, Nombre de Dios, 31150 Chihuahua, Chih. México
[2]Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), Miguel de Cervantes 120, Complejo industrial Chihuahua, Chihuahua, Chih. México
[3]Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH), Av. Pascual Orozco s/n, Campus 1, Santo Niño, 31160 Chihuahua, Chih. México.
[4]Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales-UACH, Km. 2.5 carretera a Rosales, Poniente, 33000 Delicias, Chih. México.
[5]SECIHTI-CIMAV, Miguel de Cervantes 120, Complejo industrial Chihuahua, Chihuahua, Chih. México.

Correo del autor de correspondencia: antonia.luna@cimav.edu.mx

RESUMEN

La decreciente producción de maíz exige desarrollar bioestimulantes innovadores para el cultivo. Este estudio evaluó el efecto de la concentración de un nanocomposito (NC), respecto al selenio y ácido salicílico, en la germinación y desarrollo de plántulas de maíz. Esto mediante un tratamiento nanopriming a las semillas (hibrida y criolla), para su germinación y posterior trasplante de plántulas en maceta. También se incluyeron semillas tratadas con agua (hidropriming, HC) y sin tratamiento (C). Ambas semillas presentaron tiempos medios de germinación cortos (~1-2 días) y porcentaje de germinación entre 95-100% y ~80 para aquellas con y sin tratamiento, respectivamente. Se notó una diferencia positiva leve en las semillas criollas con nanopriming (98-100%) contra HC (95%), pero sin variación en la concentración de NC. Las semillas criollas presentaron brotes y raíz con mayor longitud con respecto a las híbridas, con tendencia a disminuir levemente conforme aumentó la concentración del NC. Con relación a las plántulas en maceta, el tratamiento nanopriming favoreció un mayor número de hojas, longitud y grosor del tallo. En general, el tratamiento nanopriming en dosis del NC con 10 mg/L base selenio y ~3.0 mg AS /L, es adecuado para bioestimular el desarrollo de ambas variedades de maíz. Las semillas de maíz tratadas con el NC, ofrece una alternativa innovadora a los productores, para bioestimular el desarrollo y la producción de este cultivo.

PALABRAS CLAVE: *crecimiento; genotipos; hidropriming; nanopriming.*

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays L.)* es el cultivo de mayor valor económico, ecológico, social y cultural en México. Sin embargo, la alta ocurrencia de sequías, lluvias irregulares, plagas y enfermedades han provocado una reducción de casi 10 millones de toneladas en su producción durante 2024 (FAO, 2025)

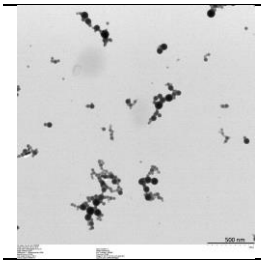
En Chihuahua, la producción de maíz ocupa el 6to lugar a nivel nacional, donde se destaca el maíz forrajero y el de grano amarillo. Los registros del SIAP (2024) revelan que la producción de maíz de temporal presenta tendencias decrecientes, del 2022 al 2023 y del 2023 al 2024, la producción de maíz de grano disminuyó 31% y 20%, respectivamente. Este comportamiento requiere del desarrollo de estrategias innovadoras para bioestimular el desarrollo y producción de este cultivo. Al respecto, el desarrollo de nanocompositos (NC) es una estrategia que aporta soluciones innovadoras para mejorar varios aspectos de la agricultura, que van desde la liberación controlada de nutrientes, la protección de cultivos contra condiciones de estrés hasta la preservación post cosecha (Gupta, *et al*., 2023). A través de la técnica del nanocebado (nanopriming en inglés) se puede bioestimular la germinación y desarrollo de plantas de cultivos agrícolas para mejorar la tasa de producción.

Las nanopartículas de selenio (SeNPs) han demostrado mejorar la germinación y el desarrollo vegetal al actuar como antioxidantes (Mishra *et al*., 2025). Por su parte, el quitosano favorece la germinación, al proteger a la semilla de la deshidratación y mostrar efectos antimicrobianos (Saberi-Riseh *et al*., 2024; Ke *et al*., 2021). Por otro lado, el ácido salicílico (AS) en bajas concentraciones, incrementa la germinación y longitud de raíces al reducir especies reactivas de oxígeno y proteger las membranas celulares (Gordillo-Curiel *et al*., 2020). Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la concentración de un NC (respecto al selenio y ácido salicílico) en la germinación y desarrollo de plantas de maíz híbrido 1 y criollo 2, con amplia distribución entre los agricultores del estado de Chihuahua.

MATERIALES Y METODOS

Síntesis del nanocomposito y dispersión. El nanocomposito (NC) de selenio-quitosano-ácido salicílico se obtuvo en dos pasos: 1) La síntesis de las nanopartículas de Se estabilizadas con quitosano (Se-Qt NP) fue acorde a lo reportado por Liu *et al*. (2019); y 2) El ácido salicílico se acopló a las Se-Qt NP por medio de interacciones electrostáticas entre los grupos NH_2 del quitosano y los grupos carboxilo e hidroxilo del AS. El AS residual del NC se eliminó por medio de diálisis con una membrana de tamaño de poro de 2 kDa, por 24 h. En el cuadro 1 se presentan algunas de las características fisicoquímicas del NC.

Cuadro 1. Características fisicoquímicas del nanocomposito.

Tamaño y morfología*		**Tamaño hidrodinámico#**	**% de carga&**	
			Se	**AS**
	Esféricas, tendencia central de 50 nm	Diámetro 734 nm ±185	74.6±1.3	22.3±8.5

Analizados por: *MET, #DLS, &Se por ICP-OES y AS por UV/Vis a 296 nm. El porcentaje de carga se estimó a partir del Se y AS inicial (7.89 y 8.3 mg por reacción).

La dispersión madre del NC (Aprox. 230:72 mg L^{-1} Se-Qt NP:AS) se sonicó en un baño ultrasónico por 15 min. A partir de ésta, se prepararon diluciones en agua tridestilada para obtener las concentraciones de los distintos ensayos.

Se evaluaron dos genotipos de maíz con importancia en la región: un tipo híbrido amarillo (Pionner 1382) y un criollo blanco (16 carreras) adquirido con productores de la región de Balleza, Chihuahua.

Tratamientos, germinación y trasplante de plántulas. El nanocebado se realizó en las semillas, previamente desinfectadas con hipoclorito de sodio 2.5% por 10 min. Luego, se embebieron en 50 mL del NC con las concentraciones estimadas de Se (1, 10 y 50 mg L^{-1}) y respectivas de AS (0.3, 3 y 15 mg L^{-1}), por 24 h bajo agitación suave. Los tratamientos se identificaron como TNC1, TNC10 y TNC50, respectivamente. Como control de referencia, se usaron semillas embebidas en agua tridestilada estéril (hidrocebado), identificadas como CH.

La germinación de las semillas tratadas con el NC se evaluó en cajas de plástico con tapa, las cuales contenían papel de filtro humedecido con agua tridestilada estéril (0.1 Ml cm^{-2}). Sobre el papel se dispusieron 20 semillas para cada tratamiento con NC, para el control con hidrocebado (CH) y sin cebado (C). Todos los tratamientos y controles se realizaron por triplicado. Las cajas se incubaron en oscuridad a 27 °C durante 3-4 días, tras lo cual se calculó el porcentaje de germinación y el tiempo medio de germinación (TMG), de acuerdo con ecuaciones previamente reportadas por Mishra *et al*. (2025).

Finalmente, en macetas de 15 cm de diámetro con suelo:fibra de coco:vermiculita 1:1:1 p/p, se trasplantaron 3 plántulas de cada tratamiento y de cada control del ensayo de germinación, todos por triplicado. Las macetas se dejaron a la intemperie con media sombra y después de 7 días se contabilizó el número de hojas y se midió la longitud y grosor del tallo con el apoyo de un vernier.

A los resultados se les hizo una estadística descriptiva para comparar promedios provenientes de las réplicas de los experimentos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tiempo medio y porcentaje de germinación de semillas de maíz. El TMG y el porcentaje de germinación de las semillas híbridas y criollas se presentan en la Figura 1 a y b, respectivamente. No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos para el TMG. En general, la duración del TMG fue corta con respecto al reportado en estudios similares en variedades de maíz híbrido como el FH-810 y el Waxi con 20 y 6 días, respectivamente (Rehman *et al*., 2015; Mahakham *et al*., 2016). La segunda variedad, se reportó como un maíz añejado, ya que estuvo almacenado cerca de 10 años a 8 °C y 2 años más a temperatura ambiente, lo que posiblemente contribuyó a reducir la viabilidad de la semilla. Mientras que las semillas usadas para este experimento fueron de la cosecha anterior, esto sugiere una alta actividad metabólica, condición que se pudo visualizar en el TMG.

Con respecto al porcentaje de germinación, se observaron tasas menores en las semillas sin tratamiento (C) en alrededor del 80%. Mientras que las semillas sometidas a nanoprimig o CH, mostraron tasas de germinación entre el 95 y 100%, lo cual muestra

que estos tratamientos bioestimularon la emergencia de la semilla, donde el tratamiento nanopriming en las semillas criollas fue el más sobresaliente con valores de germinación entre el 98 y 100% en las diferentes concentraciones del NC, mientras que el CH resultó en 95% de germinación.

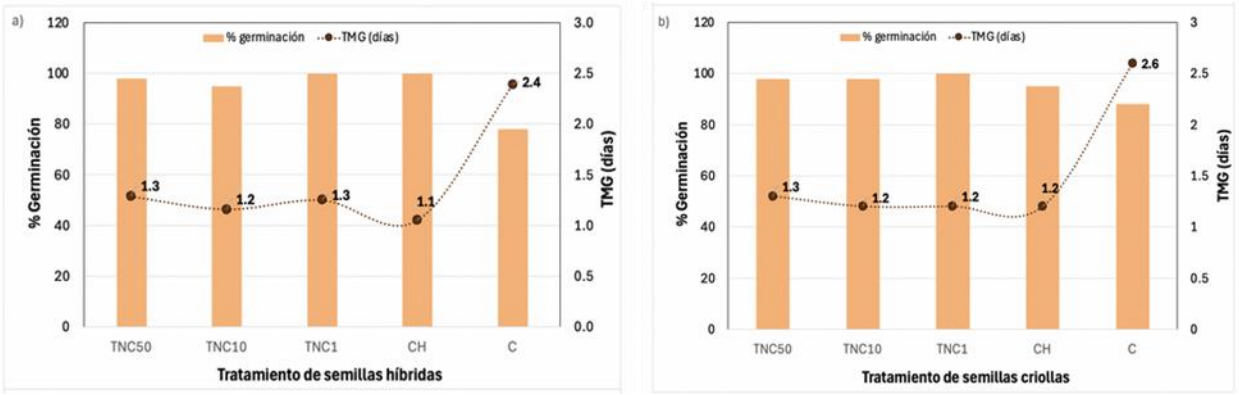


Figura 1. Porcentaje de germinación y TMG de las variedades de semillas de maíz: híbrida Pioner 1382 (a) y criolla (b), sometidas a nanopriming con diferentes concentraciones del NC (TNC) e hidropriming (CH), así como sin tratamiento (C).

Longitud de raíz y brote. A los germinados de las dos variedades de maíz, se les midió la longitud de raíz y brote (Figura 2), notando valores más altos en las semillas criollas. También se pudo observar una diferencia clara entre los valores de controles sin tratamientos y los tratamientos CH y nanopriming. En contraste con lo observado en la respuesta de germinación, la longitud de raíz y brote mostró una tendencia a disminuir levemente conforme incrementó la concentración del NC, siendo más notoria en la concentración más alta, en ambas semillas.

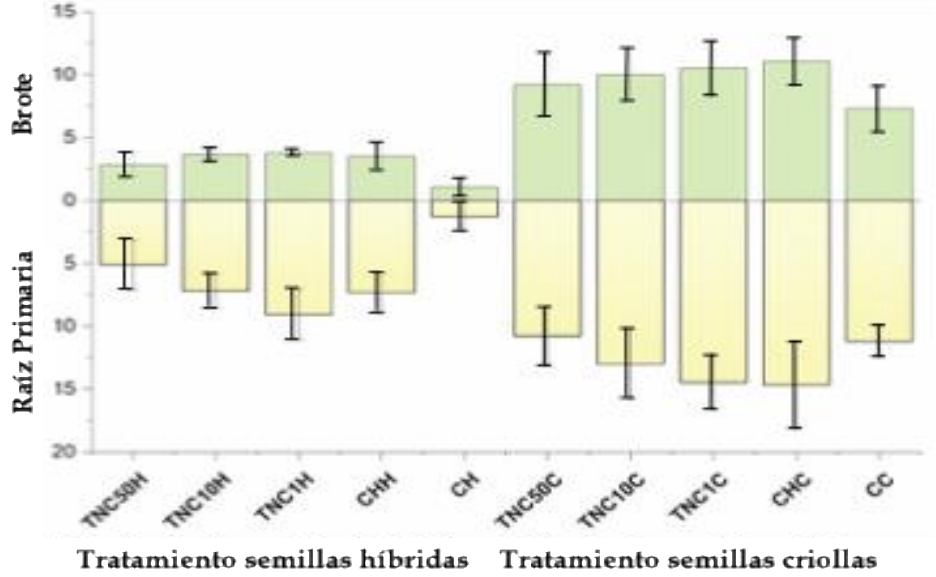


Figura 2. Longitud de raíz y de brote en germinados de semillas de maíz híbrida Pioner 1382 y criolla, tratadas (nanopriming y CH) y sin tratar (C).

Con el fin de caracterizar el vigor de las plántulas de maíz trasplantadas en maceta, se midió el número de hojas, así como el grosor y longitud del tallo. Los tratamientos nanopriming presentaron mayor número de hojas, longitud y grosor del tallo en referencia con los controles sin tratamiento y CH. Además, se notó una tendencia de incremento en los valores de los tres parámetros evaluados, conforme incrementó la concentración del NC. Al considerar que las dos concentraciones más altas tienen valores cercanos entre sí, se sugiere que la concentración de 10 mg L^{-1} base selenio (con ~3 mg L^{-1} de AS) sería la más adecuada para bioestimular el vigor y desarrollo de plantas de ambos genotipos de maíz. El nanopriming con una concentración similar de SeNPs promovió la germinación y vigor de semillas de arroz (Mishra *et al*., 2025). De forma similar, el priming con ácido salicílico (50 mg L^{-1}) también tuvo efectos favorables en la germinación y vigor de plántulas de otra especie de maíz híbrido FH-810 (Rehman *et al*., 2015). La cantidad de AS en el NC que se encontró como más adecuada es algo menor, lo que sugiere que éste estaría actuando en sinergia con el Se.

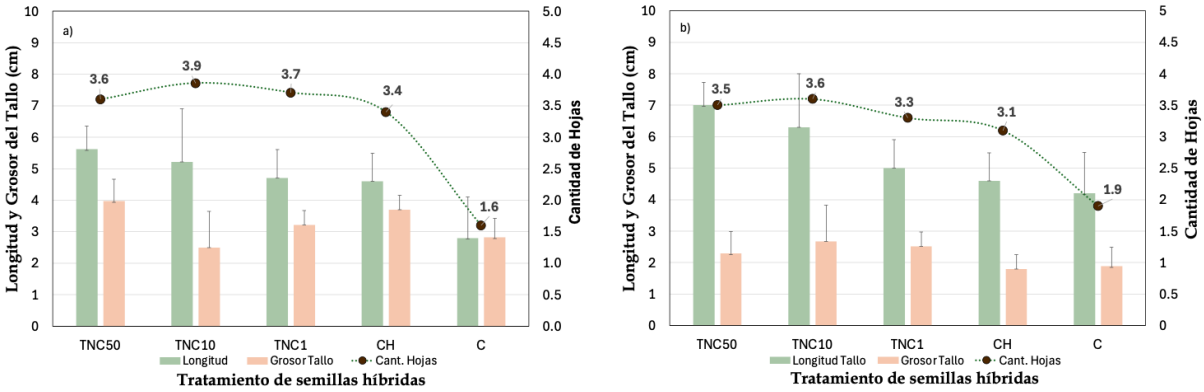


Figura 3. Número de hojas, longitud de raíz y de brote de plántulas de maíz: a) híbrida Pioner 1382 y b) criolla, a partir de semillas tratadas (nanopriming y CH) y sin tratar.

CONCLUSIONES

Las semillas de maíz evaluadas poseen porcentajes altos de germinación y cortos tiempos medios de germinación. El tratamiento de nanopriming muestra un leve efecto positivo en la germinación de semillas criollas independiente de la concentración, mientras que disminuye levemente el vigor de los germinados. Sin embargo, se pudo observar un efecto bioestimulante en el vigor de las plántulas de ambos genotipos, acentuado este efecto conforme aumenta la concentración del NC.

Las semillas de maíz tratadas con el NC en concentraciones moderadas de Se y AS, ofrece una alternativa innovadora a los productores, para bioestimular el desarrollo y la producción de este cultivo.

AGRADECIMIENTOS

Al CIMAV y al Fondo Estatal de Ciencia y Tecnología de Chihuahua por el apoyo económico (27021 y FECTI/2024/CV-CDF/005). Al técnico Raúl Ochoa y Lilia Bautista por el apoyo en TEM y TH del NC.

BIBLIOGRAFÍA

FAO. (2025). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Maize production of 2024 season estimated below average, as dry conditions discouraged sowings. https://www.fao.org/giews/countrybrief/country.jsp?code=MEX. Último Acceso, 2 de septiembre de 2025.

Gordillo-Curiel, A., Rodríguez-Larramendi, L.A., Salas-Marina, M. Á. & Rosales Esquinca, M. de los Ángeles. (2020). Efecto del ácido salicílico sobre la germinación y crecimiento inicial del café (*Coffea arabica* L. var. Costa Rica 95). *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia, 38*(1), 43-59. Recuperado de https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/34729.

Gupta, A., Rayeen, F., Mishra, R., Tripathi, M., & Pathak, N. (2023). Nanotechnology applications in sustainable agriculture: An emerging eco-friendly approach. *Plant Nano Biology, 4,* 100033. https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100033.

Ke, C., Deng, F., Chuang, C. & Lin, C. (2021). Antimicrobial Actions and Applications of Chitosan. *Polymers, 13*(6), 904. https://doi.org/10.3390/polym13060904.

Liu, L., Xiao, Z., Niu, S., He, Y., Wang, G., Pei, X., Tao, W. & Wang, M. (2019). Preparation, characteristics and feeble induced-apoptosis performance of non dialysis requiring selenium nanoparticles chitosan. *Materials and Design, 182*, 108024. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108024.

Mahakham, W., Theerakulpisut, P., Maensiri, S., Phumying, S., & Sarmah, A. K. (2016). Environmentally benign synthesis of phytochemicals-capped gold nanoparticles as nanopriming agent for promoting maize seed germination. *Science of the Total Environment, 573*, 1089-1102. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.120.

Mishra, M., Shukla, N., Fatima, M. & Singh, N.K. (2025). Biogenic selenium nanoparticles as nanopriming agents: Promoting germination and strengthening antioxidant defense in rice (*Oryza sativa* L.). *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 65*, 103568. https://doi.org/10.1016/j.bcab.2025.103568.

Rehman, U. H., Iqbal, H., Basra, S. M. A., Afzal, I., Farooq, M., Wakeel, A. & Wang, N. (2015). Seed priming improves early seedling vigor, growth and productivity of spring maize. *Journal of Integrative Agriculture, 14*(9), 1745-1754. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)61000-5.

Saberi-Riseh, R., Gholizadeh-Vazvani, M., Vatankhah, M., & Kennedy, J.F. (2024). Chitosan coating of seeds improves the germination and growth performance of plants: A review. *International Journal of Biological Macromolecules, 278*, 134750. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134750.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SIAP. (2024). Avances de siembras y cosechas por estado, por mes y año. Recuperado de https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/.

ENSEÑANZA DE LA FÍSICA BÁSICA EXPERIMENTAL EN LAS CIENCIAS AGRÍCOLAS: CONSTRUCCIÓN DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA SIMULAR LA DENSIDAD APARENTE DEL SUELO

Román Roberto Vásquez Rendon[1]; Victorino Gómez Valenzuela[1]; Carmen Elizabeth Camacho Ortiz[2]; Eber Enrique Orozco Guillen[2]; Daniela Gómez Rendón[3].

[1] Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria Sursureste, 86800, Teapa, Tabasco, México.
[2] Universidad Politécnica de Sinaloa, 82199, Mazatlán, Sinaloa, México.
[3] Sistemas de Ingeniería, 71230, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

Correo del autor de correspondencia: rvasquezr@chapingo.mx

RESUMEN

Este estudio explica el desarrollo de un laboratorio virtual para la enseñanza del concepto de Densidad Aparente del Suelo en un programa educativo de Agronomía. El objetivo de este trabajo fue diseñar un laboratorio virtual que permitiera la enseñanza del concepto de densidad aparente del suelo aplicando una didáctica transformadora. Este proyecto se realizó en el marco de la asignatura Física Básica Experimental en la URUSSE de la UACh, ubicada en Teapa, Tabasco, usando la metodología de la Investigación Basada en Diseño. Los resultados clave de este estudio incluyen el desarrollo de una secuencia pedagógica para enseñar conceptos fundamentales de las ciencias agropecuarias, en conjunto con la creación de un laboratorio virtual diseñado para explorar principios teóricos de la ciencia del suelo. Las conclusiones indican que el uso de enfoques didácticos diversos permite al educando la metacognición desde distintos estilos de aprendizaje y se observa una respuesta positiva hacia los procesos de aprendizaje agronómicos apoyados en simuladores. Adicionalmente, la observación simulada de una propiedad física del suelo promueve la apropiación del concepto densidad aparente al convertir una representación teórica en una propiedad observable.

PALABRAS CLAVE: *Agronomía; prototipo; secuencia didáctica; simuladores.*

INTRODUCCIÓN

Los procesos de enseñanza en el contexto universitario han evolucionado en respuesta a las necesidades emergentes, cambios en las expectativas y cambios tecnológicos, adaptando sus metodologías en función de la dinámica del aprendizaje (Bustos, 2025). El uso de herramientas didácticas como simuladores virtuales cobra importancia en el campo educativo actual, ya que los estudiantes encuentran en esta aproximación una herramienta útil para su aprendizaje, ya que permite la verificación de conceptos y la construcción de conocimiento (Chávez y Mestres, 2023). En este sentido, en México, las herramientas de enseñanza de la ciencia del suelo son limitadas (Bautista *et al.*, 2025), por lo que producir y difundir plataformas de enseñanza de la ciencia, específicamente del suelo, es una actividad esencial en la docencia de las ciencias agrícolas. En este sentido,

en este trabajo se presenta el proceso de construcción de un laboratorio virtual para la enseñanza del concepto de la densidad aparente del suelo (LVDAP).

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante el periodo de 2023 a 2025, mediante programación en JavaScript y HTML, con apoyo de la librería Three.js, se generó una plataforma virtual para la simulación de la densidad aparente del suelo mediante el uso del entorno de desarrollo denominado Microsoft Visual Studio® (Microsoft Corporation, versión 1.70.0, 2023). Para el diseño y conformación del LVDAP se siguió la metodología de investigación basada en diseño (IBD), la cual se fundamenta en la introducción de un elemento nuevo para transformar una situación de aprendizaje. Estos elementos de la secuencia didáctica son recurrentes e iterativos, mejorando después de cada ciclo de prueba. Así, este enfoque permite la mejora del recurso didáctico, en este caso simulador, al someterlo a validación y mejora (De Benito y Ibáñez, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de una situación puntual: La enseñanza del concepto de densidad. La densidad es un concepto básico de la formación en la física de fluidos, por lo que manejar adecuadamente sus implicaciones y procesos reflexivos donde interviene se vuelve fundamental en la formación de estudiantes de ingeniería. Aunque existen diversos enfoques para la enseñanza-aprendizaje de la densidad, para el desarrollo de este trabajo, se consideró el enfoque de concepto estructurante (Botero, 2010). En el mismo, se propone una intervención didáctica alrededor del concepto de densidad, con la finalidad de desarrollar el concepto de densidad aparente del suelo con apoyo de las herramientas clásicas de la enseñanza, desde el enfoque conceptual, hasta el práctico, para finalizar con una actividad integradora con el uso de un simulador virtual que permita observar la propiedad simulada en las distintas capas de un perfil de suelo. Como es sabido, a densidad aparente se puede relacionar con la textura del suelo y viceversa, por lo que la comprensión de ambos conceptos se relaciona y este es el principio sobre el que se parte para representar virtualmente los espacios vacíos en cada capa del suelo mediante una herramienta de acceso en línea, donde el estudiante puede practicar en cualquier momento. Esta simulación, respeta las proporciones entre textura y Dap establecidas por la ciencia del suelo y específicamente, las indicadas por Ortiz-Solorio (2019).

Metodología de uso del laboratorio virtual para la observación de la densidad aparente. El valor de la Dap del suelo se suele obtener por métodos de campo y de laboratorio como el método del cilindro y el método del terrón parafinado. Por principio, cuanto mayor sea el valor de la densidad aparente, el suelo será más pesado, lo que significa que el movimiento de fluidos será más tortuoso y, de manera contraria, cuanto menor sea el valor de la densidad aparente, existirá mayor espacio poroso en el suelo. Con la incorporación del laboratorio virtual a la práctica de la enseñanza, se simulan las galerías presentes en el suelo, lo que permite observar esos espacios libres donde se mueven los fluidos en el perfil. Este laboratorio virtual sigue en proceso de mejora según IBD, por lo que se continúa la realización de pruebas y actualización.



Figura 9. Laboratorio virtual en desarrollo.

En la Figura 1, se puede observar que el laboratorio permite simular las condiciones de la Dap en distintos horizontes del suelo. Los horizontes del suelo son capas con propiedades distintas, que se forman mediante procesos patogenéticos progresivos en el tiempo, lo que hace que cada capa pueda analizarse mediante sus propiedades. En esta primera figura, notamos claramente que la capa intermedia (2) tiene una densidad aparente mayor, lo que significa en la práctica que existen menos espacios vacíos. Los valores de referencia de Ortiz (2019) permiten obtener 8 clases de datos discretos programables en 5 capas de suelo, lo cual permite al estudiante simular el comportamiento de un suelo con cinco capas. Por lo que en esta herramienta de simulación es posible representar un suelo con cinco capas y distintas texturas, relacionando textura y Dap. Así, al codificar tridimensionalmente parte de la información del trabajo de Godínez-Montemayor (2024), se produce un pedón tridimensional con cuatro capas (horizontes de suelo, Ap, AB, Bk y Bck). Estas capas se diferencian por la textura, lo cual significa que mientras más arcilla tenga el horizonte del suelo, la densidad será mayor y el bloque representado será más liso, y mientras la capa representada tenga menor Dap, el bloque tendrá más vesículas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de perfil de suelo con labranza convencional (Godínez-Montemayor, 2024).

Horizonte	Espesor (cm)	% arena	% limo	% arcilla	Textura	M.O. (%)	Color
Ap	0-34	38	40	22	Arcilla	1.6	10 YR 5/2
AB	34-47	34	26	40	Franco arcilloso	1.64	10 YR 5.5/2
Bk	47-75	38	36	26	Franco arcilloso	1.64	10 YR 6/2
Bck	>75	31	40	29	Arcilla	1.39	10 YR 6/3

Esta representación tridimensional (Figura 2) ayuda a entender cómo cada capa del perfil de un suelo se comporta de manera diferente, y en un proceso de comprensión más complejo, permite relacionar otros procesos físicos que ocurren en el suelo, principalmente los relacionados con el transporte de fluidos, y, por lo tanto, de nutrientes.

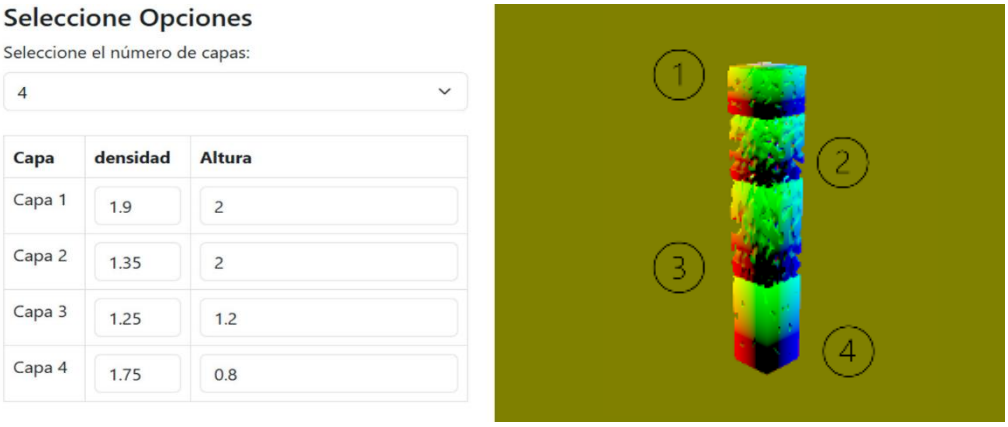


Figura 10. Representación virtual de la Dap de un perfil de suelo descrito en campo.

De la representación, podemos observar que el espesor de las capas es del orden 4 > 3 > 2 > 1. También, siguiendo la lógica mencionada con anterioridad, podríamos interpretar que la Dap de mayor a menor sigue el orden de 4 > 3 > 2 > 1. Así, podemos observar que las propiedades de textura y densidad aparente del suelo están relacionadas fuertemente y que esta relación puede aprovecharse para diseñar un elemento didáctico funcional para estudiantes de las ciencias agrícolas.

CONCLUSIONES

La construcción de un laboratorio de simulación para el estudio de la ciencia del suelo basado en el enfoque de IBD es una oportunidad para el desarrollo de herramientas de apoyo para la construcción de un aprendizaje significativo en estudiantes de agronomía, integrando elementos de utilidad práctica al espacio del aula. Aunque esta propuesta puede funcionar como un recurso de apoyo en la enseñanza, se requiere continuar con el desarrollo del laboratorio virtual y validar estos elementos dentro de una secuencia didáctica que promueva el aprendizaje significativo en estudiantes de las ciencias agronómicas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Autónoma Chapingo y la Unidad Regional Universitaria SurSureste (URUSSE) por proporcionar los medios para la realización de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Bautista F., Gallegos, A., Palma-López, D., Zavala, J., Estrada-Melina, H., Aguilar, Y., Gijón, N., Goguitchaichvili, A., Sánchez, F., Quintana, P. & López, A. (2025). La Enseñanza de las Ciencias del Suelo en el Siglo XXI Usando las Redes Sociales e Internet. En Fernández-Luqueño, F., G. Medina-Pérez, Barrios, D. & D. Flores-Rentería (Eds.), *Suelos Sanos y Resilientes para el Desarrollo Sostenible* (pp. 578-583). Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.

Botero Q., H. (2010). Una revisión del concepto de densidad: la implicación de los conceptos estructurantes en el proceso de enseñanza-aprendizaje. *Revista de Educación y Pensamiento*, *17*, 23-32. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4040358.pdf.

Bustos R., N. (2025). Espacios experimentales para la enseñanza de la biología en la educación universitaria. *Revista Digital de Investigación y Postgrado*, *6*(11), 49-62. https://doi.org/10.59654/7peppt81.

Chavez F., J. G., & Mestres G., U. (2023). Simuladores PHET: como herramienta didáctica para la enseñanza y aprendizaje experimental de física. *Polo del Conocimiento*, *8*(11). https://doi.org/10.23857/pc.v8i11.6337.

De Benito C., B. L., & Ibáñez, J. M. S. (2016). La investigación basada en diseño en tecnología educativa. *Revista Interuniversitaria de Investigación En Tecnología Educativa*. https://doi.org/10.6018/riite2016/260631.

Godinez-Montemayor, M. F., Gutierrez-Castorena, E. V., Espinosa R., M., Encinia-Uribe, V. V., Carillo V., N., & Gutiérrez-Castorena, M. C. (2024). Impacto de la labranza de conservación en la salud del suelo versus convencional en sistemas productivos agrícolas [Electrónico]. En *Suelos sanos y resilientes para el desarrollo sostenible* (Vol. 1, pp. 6-10). Fabián Fernández-Luqueño, editor; Gabriela Medina Pérez, editora; Dámaris L. Ojeda Barrios, editora; Dulce Y. Flores Rentería, editora.

Microsoft Corporación. (2023). Visual Studio Code (Versión 1.70.0) [Software]. Recuperado de https://code.visualstudio.com/.

Ortiz-Solorio, C.A. (2019). *Edafología*. Trillas. México.

USO DE MODELOS DE APRENDIZAJE AUTOMÁTICO EN LA EVALUACIÓN DE SUELOS AGRÍCOLAS DEL SURESTE DEL ESTADO DE COAHUILA

René Juárez Altamirano[1]; Mario A. Guevara Santamarina[2]; Dulce Flores Rentería[3].

[1] Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Cinvestav Saltillo. Doctorado en Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía.
[2] Instituto de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
[3] Secihti-Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Cinvestav Saltillo. Posgrado en Sustentabilidad de los Recursos Naturales y Energía.

Correo del autor de correspondencia: yaahid.flores@cinvestav.edu.mx

RESUMEN

La calidad del suelo es un factor clave para la sostenibilidad agrícola, especialmente en regiones semiáridas donde la presión sobre los recursos es mayor. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el potencial de los algoritmos basados en inteligencia artificial integrando datos de percepción remota, atributos topográficos y análisis fisicoquímicos. Se generó una base de datos con diferentes propiedades fisicoquímicas del suelo obtenidas en sitios con manejo convencional de los propietarios. A cada punto se asociaron datos espectrales y variables del terreno derivadas de un modelo digital de elevación (MDE). Se aplicó un análisis de componentes principales (PCA) para explorar la estructura de los datos y reducir la dimensionalidad. Posteriormente, se entrenó un modelo de *random forest* para predecir la conductividad eléctrica (CE) del suelo, utilizando variables espectrales, topográficas y fisicoquímicas como predictores. El modelo se ejecutó 100 veces con remuestreo aleatorio para mejorar su robustez. El modelo alcanzó un coeficiente de correlación de 0.739 y un RMSE de 0.270, mostrando su potencial en la predicción de propiedades del suelo. Se generaron mapas de predicción y de incertidumbre, revelando una distribución espacial heterogénea de la CE, relacionada con el contenido de carbono y pH del suelo. Estos resultados muestran el potencial de combinar datos multifuente con técnicas de inteligencia artificial para generar herramientas de monitoreo útiles en la gestión sostenible de los suelos agrícolas.

PALABRAS CLAVE: *Agricultura; Calidad del suelo; machine learning; random forest.*

INTRODUCCIÓN

La calidad del suelo es un componente fundamental para la sostenibilidad de los sistemas agrícolas, especialmente en regiones semiáridas, donde la presión sobre los recursos es mayor, como el sureste del estado de Coahuila. La evaluación de la calidad del suelo se ha abordado con el análisis de métodos físicos, químicos y biológicos que, si bien son precisos, resultan costosos, además de que no son representativos en el espacio ni en el tiempo. Por ello, las tecnologías de percepción remota resultan una alternativa eficiente para monitorear sistemas agrícolas mediante imágenes satelitales. Por otro lado,

los algoritmos de inteligencia artificial han demostrado su utilidad para modelar relaciones complejas propias de los sistemas naturales. En este sentido, algoritmos como *random forest* han demostrado alto potencial para predecir atributos del suelo a partir de datos multiespectrales, geográficos y ambientales.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la calidad del suelo en sitios agrícolas del sureste de Coahuila mediante la integración de datos de percepción remota y algoritmos de inteligencia artificial. Se busca generar modelos de predicción que permitan identificar patrones espaciales aportando herramientas prácticas para la gestión sostenible de los recursos agropecuarios en esta región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. La región sureste del estado de Coahuila de Zaragoza está compuesta por los municipios de Saltillo, Ramos Arizpe, Parras de la Fuente, General Cepeda y Arteaga. Esta región se caracteriza por la formación de diversos climas locales, que van de semiárido a templado, con temperaturas medias anuales de 14 a 35 °C. La precipitación anual promedio varía entre 223 y 545 mm, concentrándose principalmente en los meses de julio, agosto y septiembre. Los suelos dominantes para la región son leptosoles y calcisoles (CONAGUA, 2019). Dentro de la región de estudio se seleccionaron parcelas agrícolas representativas en cada uno de los municipios. Estos sitios mantienen un manejo convencional por parte de los productores y se encuentran establecidos con cultivos bajo sistemas de riego, excluyendo especies leñosas.

Diseño de muestreo. Para este trabajo se realizó un muestreo en campo sistemático, la distancia de separación entre puntos de muestreo varió dependiendo del área de cada una de las parcelas. Se tomaron 20 puntos de muestreo por parcela, colectando 1 kg de suelo a una profundidad de 0-30 cm. En cada punto se registraron las coordenadas de georreferenciación. Se recolectaron y analizaron un total de 165 muestras de ocho campos agrícolas. Las muestras recolectadas se almacenaron y transportaron al laboratorio de sustentabilidad del suelo para su posterior análisis.

Todas las muestras de suelo se secaron al aire, se tamizaron a 2 mm y se analizaron para diferentes propiedades del suelo. La humedad del suelo se determinó por el método gravimétrico. El pH que se midió en una suspensión suelo (relación suelo-solución: 1:2) utilizando el equipo Thermo Scientific modelo Orion Star A211; la misma suspensión se utilizó para medir la conductividad eléctrica (CE) del suelo con el equipo. La densidad aparente se obtuvo a partir del método de la probeta (Radulovich, 2009). El contenido de materia orgánica del suelo se determinó por el método de calcinación a 400 °C durante 4 h. La textura del suelo se determinó por el método del hidrómetro (Beretta *et al.*, 2014).

Generación e integración de variables geoespaciales. Parte de los insumos utilizados en este trabajo, se obtuvieron bandas espectrales provenientes de imágenes satelitales del sensor Sentinel-2 de los años 2023 y 2024. Estas imágenes fueron descargadas desde la plataforma Google Earth Engine y seleccionadas considerando la mínima cobertura de nubes. Las bandas utilizadas incluyeron las Bandas 2 a 12, con una resolución espacial de 20 m^2/píxel. Finalmente, se obtuvo información del terreno, derivada de un Modelo

Digital de Elevación (MDE) con resolución espacial de 30 m/píxel. Los atributos se calcularon en SAGA GIS empleando los módulos *Terrain Analysis*.

Análisis de datos. Para el análisis, los datos obtenidos de diversas fuentes fueron armonizados. Las imágenes satelitales y atributos del terreno fueron reproyectados para que coincidieran en resolución espacial. Todos los datos se integraron en una base de datos, este procedimiento permitió asociar a cada muestra de campo los valores de reflectancia y características del terreno. Se llevaron a cabo análisis exploratorios para evaluar la distribución y el comportamiento de las variables, así como su relación. Adicionalmente, para explorar la estructura interna de los datos y evaluar posibles relaciones entre las variables predictoras, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA). Este análisis proporcionó una base para la selección de variables en etapas posteriores de modelado, además de ofrecer una visión global del comportamiento multivariado del sistema agrícola bajo estudio (Arias *et al.,* 2018).

Posteriormente, se procedió a la etapa de modelado predictivo, para lo cual se seleccionó el algoritmo *random forest*. Una de las principales ventajas de este algoritmo es su capacidad para estimar la importancia relativa de las variables predictoras, lo cual es especialmente útil en estudios con un alto número de variables como los que integran datos espectrales y topográficos. Además, *random forest* no requiere supuestos estrictos sobre la distribución de los datos y es menos sensible a problemas como multicolinealidad o sobreajuste (Dharumarajan *et al*., 2017). Este enfoque se utilizó para modelar la variable objetivo, en este caso la CE, a partir del conjunto de variables derivadas de sensores remotos, atributos del terreno y propiedades fisicoquímicas.

El rendimiento del modelo se evaluó mediante validación cruzada y métricas estadísticas como el coeficiente de correlación (r), que cuantifica la fuerza y dirección de la relación entre los valores observados y estimados, y el error cuadrático medio (RMSE), que mide la magnitud promedio del error en la predicción, con el fin de determinar su capacidad predictiva y utilidad práctica en sistemas agrícolas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación del Análisis de Componentes Principales (PCA) permitió identificar patrones en la estructura de los datos. Se conservaron seis componentes principales con el criterio de valor propio (Ghaemi *et al.,* 2014).

Estos primeros seis componentes capturaron el 70% de la variabilidad total. En la Figura 1 podemos observar que los dos primeros componentes principales explicaron en conjunto el 34.3% de la variación total (18.46% componente 1 y 15.86% componente 2). También se observa que la CE se correlacionó positivamente con el carbono orgánico, el carbono total y el pH, lo que sugiere suelos con algún grado de alcalinidad, algo común en regiones áridas. En contraste, variables como profundidad, contenido de arcilla y el índice de humedad superficial mostraron relación negativa con las variables antes mencionadas, sugiriendo que suelos más profundos o con más arcilla tienden a mantener pH más bajo, como se ha descrito con anterioridad (Abdel-Fattah *et al.,* 2021).

Posteriormente, con base en los resultados del PCA, se utilizaron los *scores* de los componentes principales como variables de entrada para el algoritmo Random Forest, empleado como técnica de modelado supervisado.

El entrenamiento del modelo de *random forest* presentó un coeficiente de correlación (r) de 0.739 y un error cuadrático medio (RMSE) de 0.270, lo cual indica una capacidad predictiva aceptable (Castro-Franco *et al.*, 2015).

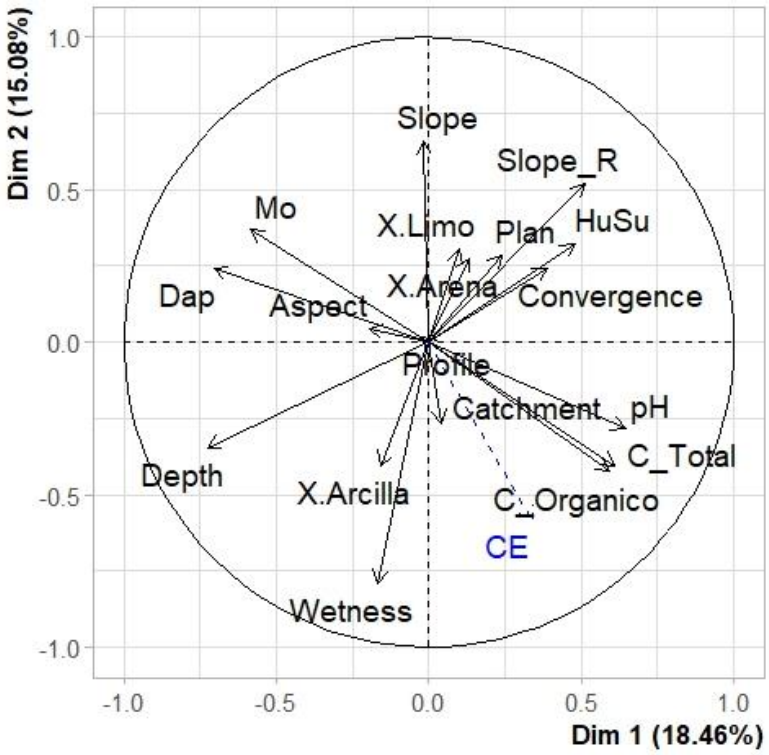


Figura 1. Análisis de componentes principales de variables del suelo.

La Figura 2 muestra el promedio de las predicciones de CE de 100 iteraciones. Se observa una distribución espacial heterogénea de la CE, con valores más altos (tonos verdes) localizados principalmente en la parte noroeste del área, y valores más bajos (tonos claros) en el centro y suroeste. Esto coincide con zonas de mayor contenido de materia orgánica y pH más elevado, como lo sugería el PCA.

La Figura 3 representa la desviación estándar promedio de las predicciones, lo cual es un indicador de la incertidumbre del modelo en cada píxel. Las zonas con tonos más claros indican predicciones más consistentes, mientras que las áreas en tonos más oscuros reflejan mayor variabilidad y, por lo tanto, menor confianza en esas estimaciones. Estas áreas de mayor incertidumbre podrían estar asociadas a zonas con menor densidad de datos observacionales, condiciones edáficas más variables o mayor complejidad en la interacción entre predictores.

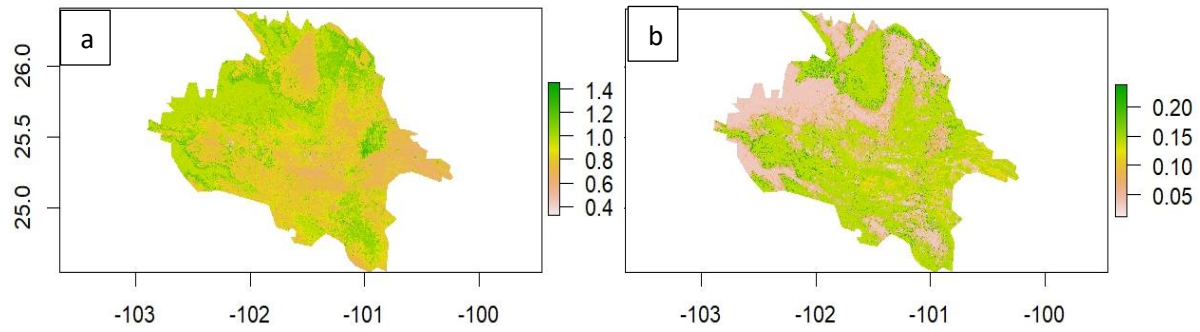


Figura 2. *a)* Modelo predictivo de la *conductividad* eléctrica en la región sureste de Coahuila, *y b)* Desviación estándar promedio del modelo para la *c*onductividad eléctrica.

CONCLUSIONES

En este trabajo se demostró el potencial del uso de datos de percepción remota para la evaluación de suelos agrícolas. Los análisis multivariados permitieron identificar relaciones entre variables del suelo que ayudan a su comprensión. Así mismo, el modelo propuesto basado en *random forest* mostró buen desempeño (r = 0.7394; RMSE = 0.270), en la predicción de la CE. Este método permitió generar mapas de incertidumbre que ofrecen información adicional sobre la confiabilidad de las predicciones en diferentes zonas. Estos resultados destacan la utilidad de enfoques integradores para generar herramientas prácticas que apoyen la gestión y conservación de los sitios agrícolas, especialmente en regiones semiáridas donde la variabilidad espacial es alta y los recursos de monitoreo son limitados.

BIBLIOGRAFÍA

Abdel-Fattah, M.K., Mohamed, E.S., Wagdi, E.M., Shanin, S.A., Aldosari, A.A., Lasaponara, R. & Alnaimy, M.A. (2021). Quantitative evaluation of soil quality using Principal Component Analysis: The case study of El-Fayoum depression, Egypt. *Sustainability*, 13(4): 1824.

Arias, O.V., Garrido, A., Villeta, M. & Tarquis, A.M.J.G. (2018). Homogenisation of a soil properties map by principal component analysis to define index agricultural insurance policies. *Geoderma*, 311: 149-158.

Beretta, A.N., Silbermann, A.V., Paladino, L., Torres, D., Bassahun, D., Musselli, R. & García-Lamothe, A. (2014). Soil texture analyses using a hydrometer: modification of the Bouyoucos method. Ciencia e Investigación Agraria, 41(2): 263-271.

Castro-Franco, M., Costa, J.L., Peralta, N. & Aparicio, V.J. (2015). Prediction of soil properties at farm scale using a model-based soil sampling scheme and random forest. *Soil Science*, 180(2): 74-85.

Comisión Nacional del Agua. (2019). Estadísticas de agua en México.

Dharumarajan, S., Hegde, R. & Singh, S.J.G.R. (2017). Spatial prediction of major soil properties using Random Forest techniques-A case study in semi-arid tropics of South India. *Geoderma Regional*, 10: 154-162.

Ghaemi, M., Astaraei, A.R., Emami, H., Mahalati, N. & Sanaeinejad, S.H. (2014). Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds-east of Mashhad-Iran. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 14(4): 1005-1020.

Radulovich, R.J.A.C. (2009). Método gravimétrico para determinar in situ la humedad volumétrica del suelo. *Agronomía Costarricense*, 33(1):121-124.

BIOFORTIFICACIÓN CON QUITOSANO-SELENATO: MEJORA DEL PERFIL NUTRICIONAL Y ANTIOXIDANTE EN GERMINADOS DE TRIGO (*Triticum spp*.)

Jazmín Montserrat Gaucin Delgado[1]; Cristian Oswaldo Solís Lopez[2]; Ricardo Israel Ramírez Gottfried[2]; Erika Guadalupe Cervantes Padrón[2]; Pablo Preciado Rangel[3]

1 Universidad Politécnica de Gómez Palacio (UPGOP). Carretera El Vergel-La Torreña km 0820, El Vergel. 35120 Gómez Palacio, Durango, México.
2 Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Periférico Raúl López Sánchez, Colonia Valle Verde. 27054 Torreón, Coahuila, México.
3 Instituto Tecnológico de Torreón (TecNM) Ctra. Torreón-San Pedro km 7,5, Ejido Ana. 27170 Torreón, Coahuila, México.

Correo del autor de correspondencia: pprecidor@yahoo.com.mx

RESUMEN

El selenio (Se) es un micronutriente esencial para la salud humana, pero su disponibilidad en los cultivos es limitada. Ante la deficiencia de Se que afecta a millones de personas a nivel global, surge la necesidad de desarrollar estrategias agrícolas eficientes para suplir esta carencia. En este estudio, se evaluó el potencial de quitosano-selenato (SeO_2^{-4}- CS) como una herramienta de biofortificación en germinados de trigo (Triticum spp.). Se analizó su influencia en parámetros agronómicos, actividad antioxidante y acumulación de Se, utilizando diferentes concentraciones. Los resultados demostraron que las SeO_2^{-4}-CS incrementaron la actividad enzimática antioxidante y, además, elevaron el contenido de compuestos fenólicos. La dosis de 0.15 mg mL^{-1} mostró el mayor efecto en metabolitos secundarios beneficiosos. Estos hallazgos confirman que la nano-biofortificación con SeO_2^{-4}-CS es una alternativa viable para mejorar la calidad nutricional de los germinados de trigo. Esta tecnología no solo aumenta el contenido de Se biodisponible, sino que también potencia las propiedades funcionales del cultivo, ofreciendo una solución sostenible a problemas de malnutrición en humanos.

PALABRAS CLAVE: *Antioxidantes enzimáticos; deficiencia de selenio; germinados de trigo.*

INTRODUCCIÓN

La biofortificación emerge como una estrategia innovadora, utilizando nanopartículas para incrementar la concentración de nutrientes esenciales en plantas, lo que impacta positivamente en la productividad, la calidad nutricional de los cultivos y, en última instancia, en la salud humana (Sariñana-Navarrete et al., 2023). Entre los compuestos más estudiados destaca el quitosano (CS), un polisacárido derivado de la quitina, reconocido por su capacidad para estimular el crecimiento vegetal y activar mecanismos de defensa frente a estrés biótico y abiótico (Arias-Andrade *et al.*, 2020).

Por otro lado, el selenato (SeO_4^{2-}), aunque no es considerado esencial para la mayoría de las plantas, ha demostrado efectos beneficiosos en el crecimiento y la tolerancia al estrés. Sin embargo, su aplicación requiere un manejo cuidadoso, ya que concentraciones elevadas pueden resultar tóxicas (Hernández *et al.,* 2024). El trigo (*Triticum spp*.), uno de los cultivos más importantes a nivel global, es fundamental en la alimentación humana (Estrada Santana et al., 2016). La biofortificación de germinados con micronutrientes como selenio, zinc y hierro surge como una estrategia viable para incrementar su valor nutricional, ofreciendo una solución sostenible ante las deficiencias de micronutrientes a escala mundial (Sayed *et al.,* 2022). En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de aplicaciones de selenato (SeO_4^{2-}) y selenato combinado con nanopartículas de quitosano (SeO_4^{2-}-CS) sobre el rendimiento, la acumulación de compuestos bioactivos, la actividad antioxidante, la actividad enzimática y la biodisponibilidad de selenio en germinados de trigo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal y condiciones de cultivo. El estudio se realizó en el laboratorio de Biotecnología de la Universidad Politécnica de Gómez Palacio, ubicada en la ciudad de Gómez Palacio, Durango (25°34'11.5'' N, 103°29'53.5'' O), a una altitud de 1120 msnm. Se utilizaron semillas de trigo Triticum spp. (Nature Jim's®, USA) de tamaño uniforme, que fueron desinfectadas con etanol al 75% durante 5 min y luego lavadas cuatro veces con agua destilada (Li *et al.,* 2019).

Ensayo de germinación y medición del crecimiento. Las semillas fueron distribuidas en catorce tratamientos, cada uno compuesto por diez semillas (Cuadro 1), bajo la metodología de (Ramírez-Rodríguez *et al.,* 2021). Los tratamientos se aplicaron por cebado una sola vez a las semillas durante la etapa de imbibición, sumergiéndolas en las soluciones correspondientes durante 8 horas en oscuridad.

Cuadro 1. Tratamientos establecidos con selenato (SeO2-4) y selenato-quitosano (SeO2-4-CS).

Tratamiento	Concentración (mg L^{-1})
Control	Agua destilada
CS	50 (quitosano)
SeO2-4	0.10, 0.50, 1.00, 1.5, 2.0 y 2.50 (selenato)
SeO_4^{2-}-CS	0.10-50, 0.50-50, 1.00-50, 1.5-50, 2.0-50 y 2.50-50 (SeO_4^{2-}-CS)

Bioactivos. i) Extracción de metabolitos. Para la obtención de extractos, se mezclaron 2 g de tejido fresco en etanol al 80% (24 h, 5 °C, 70 rpm). Después, los extractos fueron centrifugados a 3000 rpm durante 5 min, y el sobrenadante se extrajo para su análisis (Salas-Pérez *et al.,* 2016). ii) Fenoles totales. Se utilizó en el método Folin-Ciocalteu (Singleton *et al.,* 1999; λ=760 nm). Resultados expresados en mg AGE 100 g-1 PF. iii) Actividad antioxidante (DPPH). Se utilizó el método de capacidad reductora frente a radicales libres (Brand-Williams *et al.,* 1995; λ=517 nm). Valores expresados en µM TE 100 g-1 PF. iv) Acumulación de SeO2-4 en germinados de trigo. La concentración de selenato en los germinados de trigo se determinó mediante espectrofotometría de absorción atómica (EAA) (TFS®, USA)) con flama de aire-acetileno, siguiendo el método AOAC (1990). Los resultados se expresaron en µg de selenato por kg de peso seco.

Análisis estadístico. El estudio empleó un diseño factorial con 14 tratamientos (selenato y combinaciones de selenato con quitosano) evaluados por triplicado. Los datos se analizaron mediante ANOVA bifactorial ($p < 0.05$) en SAS 9.3, previa verificación de normalidad (Shapiro-Wilk) y homocedasticidad (Levene).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Bioactivos. Los análisis revelaron un incremento significativo ($p<0.05$) en la biosíntesis de fenoles totales (FT) y capacidad antioxidante (AOX) bajo tratamientos con SeO_4^{2-} y SeO_4^{2-}-CS, alcanzando valores máximos de 0.25 mg mL^{-1} SeO_4^{2-}-CS (Figura 1). Este comportamiento se explica mediante tres mecanismos interrelacionados uno en la activación redox mediada por selenio ya que el selenato induce la expresión de PAL (fenilalanina amonio-liasa) y CHS (chalcona sintasa), enzimas clave en la ruta fenilpropanoide (Puccinelli *et al.,* 2019). Paralelamente, actuando como cofactor de glutatión peroxidasa, reduciendo la peroxidación lipídica y preservando los metabolitos antioxidantes (Allam et al., 2024). Además, el efecto elicitor del quitosano que gracias a su interacción con receptores de membrana (CERK1) activas cascadas de señalización (MAPK) que incrementan la producción de ácidos fenólicos (ácido gálico y ferúlico) y los flavonoides (apigenina, luteolina) que están documentados en Triticosecale (Ramírez-Acosta et al., 2022) y Phaseolus vulgaris (Valencia-Vázquez *et al.,* 2024). Por último, la sinergia bioquímica en el complejo SeO_4^{2-}-CS que optimiza la biodisponibilidad del selenio al evitar la oxidación. Cuyos resultados son consistentes en estudios en Zea mays (Zungu *et al.,* 2023) y modelos in vitro (Mohan *et al.,* 2024).

Contenido de selenio. Los análisis revelaron un incremento significativo ($p < 0.05$) en la acumulación de selenio en germinados de Triticum spp. bajo tratamiento con SeO_4^{2-}, alcanzando concentraciones de 10.53 µg kg^{-1} con la dosis óptima de 0.25 mg mL^{-1} (Figura 4). Este valor representó un aumento del 33.6% respecto al control (7.88 µg kg^{-1}), con un factor de transferencia notable del 69%, evidenciando la eficiencia del sistema de biofortificación. Dado que el mecanismo de transporte activo del complejo SeO_4^{2-}-CS puede potencia la absorción mediante la activación del sistema de transporte de sulfatos (SULTR1;1) a nivel de membranas celulares. Además, la conversión eficiente a AP-SeO_4^{2-} por acción de la ATP sulfurilasa (Schiavon et al., 2020) y

el efecto sinérgico del quitosano que mejora la permeabilidad de membranas mediante interacción con fosfolípidos (Reyes Pérez, 2020), reduciendo la fijación de SeO_4^{2-} en medios de cultivo en un 40% e incrementando la translocación a tejidos vegetativos (relación raíz/brote 1:2.3).

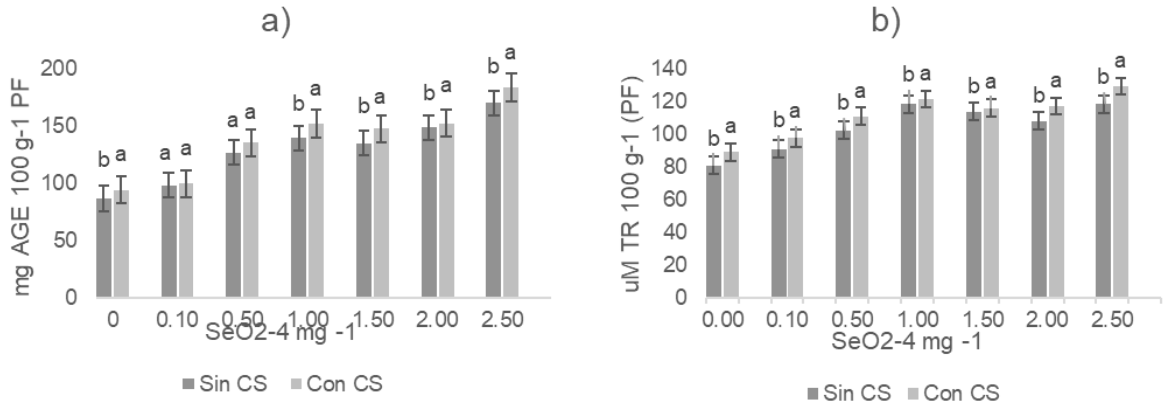


Figura 1. Compuestos fenólicos totales a) y capacidad antioxidante b) en germinados de trigo por efecto de diferentes concentraciones de SeO_2^{-4} y SeO_2^{-4} -CS. Valores seguidos de diferente letra indican diferencia estadística significativa (Tukey $p \leq 0.05$).

CONCLUSIONES

La formulación SeO_4^{2-}-CS (0.25 mg mL^{-1}) demostró ser una estrategia de biofortificación eficiente, logrando incrementos sinérgicos en actividad antioxidante mediante tres mecanismos clave, por la activación redox (selenio como cofactor de GPX, r=-0.89 con ROS), el transporte mejorado (aumento del 69% en translocación vía SULTR1;1), y la inducción metabólica (+40% fenoles vía PAL/CHS). El quitosano actuó como vector nanoestructurado, optimizando la biodisponibilidad de selenio (10.53 µg kg^{-1}, +33.6% vs control) y reduciendo el estrés oxidativo (-32% H_2O_2). Estos hallazgos revelan un equilibrio único entre bioactivación y protección, posicionando al cebado como técnica escalable para producir germinados enriquecidos, con potencial para mitigar deficiencias nutricionales humanas (equivalente al 63% del requerimiento diario de Se). La dosis óptima (0.15-0.25 mg mL^{-1}) combina eficiencia agronómica (ROI demostrado) y

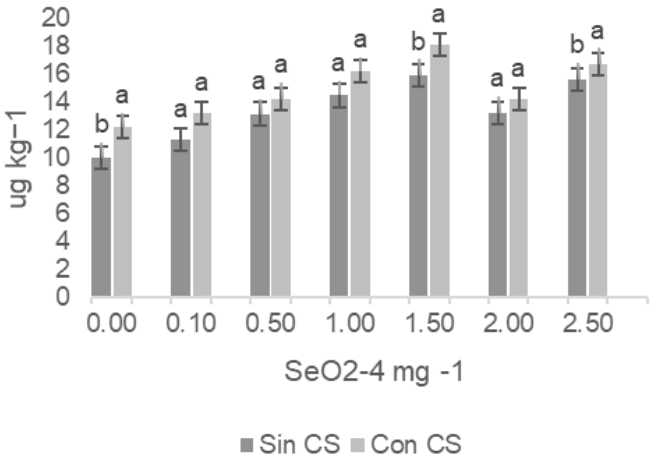


Figura 2. Contenido de selenio en germinados de trigo por efecto de diferentes concentraciones de SeO_2^{-4} y SeO_2^{-4} -CS. Valores seguidos de diferente letra indican diferencia estadística significativa (Tukey $p \leq 0.05$).

resiliencia climática, destacando su aplicabilidad en sistemas agrícolas sostenibles. Futuras investigaciones deberán evaluar la biodisponibilidad en modelos digestivos y validar su desempeño en condiciones de campo extensivo.

BIBLIOGRAFÍA

Allam, S. N., El-Darier, S. M., Ghattass, K. I., Fakhry, E. M. & Elghobashy, R. M. (2024). Chitosan nanoparticles enhance drought tolerance in Pancratium maritimum L. by modulating physiological and biochemical responses. *Plant Physiology and Biochemistry*, 196, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108234.

AOAC. (1990). Official methods of analysis (15th ed.). Association of Official Analytical Chemists.

Arias-Andrade, C., Veloza, L. & Sepúlveda-Arias, J. (2020). Chitosan in agriculture: Plant growth promotion and defense activation. *NanoImpact*, 18, 100210. https://doi.org/10.1016/j.impact.2020.100210.

Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E. & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT-Food Science and Technology,* 28(1), 25-30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5.

Hernández, R., Díaz, M. & López, J. (2024). Selenate in plants: Balance between benefit and toxicity. *Plant Science Today,* 11(1), 30-42.

Mohan, S., Pal, S. & Saharan, V. (2024). Nano-chitosan-selenate modulates phenolic metabolism in wheat sprouts. *Plant Nano Biology,* 5, 100045. https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100045.

Pérez-García, F., et al. (2023). Improved spectrophotometric methods for catalase activity determination. *Plant Methods,* 19(1), 45.

Puccinelli, M., Malorgio, F., Rosellini, I. & Pezzarossa, B. (2019). Selenium enrichment enhances bioactive compounds in basil. *Scientia Horticulturae,* 255, 14-22. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.05.018.

Ramírez-Acosta, J. P., et al. (2022). Antioxidant synergy in selenium-chitosan treated triticale. *Frontiers in Nutrition,* 9, 801233. https://doi.org/10.3389/fnut.2022.801233.

Ramírez-Rodríguez, G. B., et al. (2021). Seed priming methodologies for improved germination. *Seed Science and Technology,* 49(1), 1-18. https://doi.org/10.15258/sst.2021.49.1.01.

Reyes Pérez, J. J. (2020). Chitosan in agriculture: Action mechanisms and applications. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas,* 11(3), 689-702. https://doi.org/10.29312/remexca.v11i3.2356.

Sariñana-Navarrete, M., Reyes, J, & García, E. (2023). Nanoparticles for biofortification: Advances and perspectives. *Environmental Nanotechnology*, 5, 100123. https://doi.org/10.1016/j.enmt.2023.100123.

Sayed, A., El-Ramady, H. & Domokos-Szabolcsy, É. (2022). Biofortified sprouts: A global solution for micronutrient deficiencies. *Trends in Food Science & Technology,* 119, 508-520. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.018.

Singleton, V. L., Orthofer, R. & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology,* 299, 152-178. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1.

Valencia-Vázquez, R., (2024). Zn-chitosan nanofertilizers enhance bioactive compounds in common bean. *Scientia Horticulturae,* 323, 112501. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112501.

Zhang, L., Hu, B., Li, W., Che, R., Deng, K., & Li, H. (2014). Selenium promotes carbohydrate metabolism and photosynthesis in wheat under salt stress. *Plant Growth Regulation,* 73(1), 87-94. https://doi.org/10.1007/s10725-013-9872-x.

Zungu, N. S. (2023). Chitosan-selenium nanoparticles enhance maize germination and stress tolerance. *Plant Physiology and Biochemistry,* 184, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.12.012.

FERTILIZACIÓN QUÍMICA CON NITROFOSKA PARA CALA LILY O ALCATRAZ AMARILLO (*Zantedeschia elliottiana* Engl.)

Ma. de Jesús Juárez Hernández[1]; Zeily Martínez Fernandez[1]

[1] Universidad Autónoma Chapingo km 38.5 Carretera México-Texcoco C.P. 56263 Chapingo México.

Correo del autor de correspondencia: juarezhma@yahoo.com.mx

RESUMEN

La fertilización es un factor determinante no solo de la producción sino también de la sanidad de las plantas. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes dosis del Fertilizante Nitrofoska Novatec Premium (15-3-20+2 MgO) en el cultivo de Cala lily amarillo (*Zantedeschia elliottiana* Engl.). Para la plantación de los rizomas se establecieron 25 macetas en un diseño completamente al azar, con un sustrato a base de tierra de hoja, perlita y peat moss en proporciones iguales. Los niveles de estudio fueron cinco dosis de Nitrofoska (15-3-20+2 MgO) en presentación granular, soluble en agua, con 0, 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 g·L^{-1} y cinco repeticiones de cada tratamiento. Se evaluaron las variables altura de planta, longitud de tallo, longitud de hoja, ancho de hoja, área foliar, peso del rizoma, longitud de raíz y peso de la raíz. Se observó que con la aplicación del tratamiento 3 (1.0 g L^{-1} de Nitrofoska) se alcanzaron los mayores valores dentro de las variables altura de la planta, longitud del tallo, longitud de la hoja, área foliar, peso del rizoma y longitud de raíz. Por el contrario, en las variables ancho de hoja y peso de la raíz, el tratamiento 2 con 0.5 g·L^{-1} de Nitrofoska dejó en segundo lugar al tratamiento 3 con 1 g L^{-1}. Se concluyó que es factible fertilizar con buenos resultados a *Zantadeschia elliottiana* Engl. con una dosis de 1 g L^{-1} de Nitrofoska para obtener buenos resultados.

PALABRAS CLAVE: *Desarrollo vegetativo; dosis; rizoma; sustrato.*

INTRODUCCIÓN

La floricultura en México es una actividad importante que genera más de 250 mil empleos directos y casi un millón indirectos. México exporta alrededor de 44 mil millones de dólares americanos anuales (SADER, 2022). El alcatraz es una planta perenne de la familia de las aráceas, que llega a medir hasta 1.5 m (SIAP, 2023). La producción de alcatraz en México es un cultivo menor de flores de corte, concentrado principalmente en la zona de La Perla, Veracruz, y también en los Valles Centrales de Oaxaca, como Santa María Yolotepec (SIAP, 2023) Las calas Lily blancas o alcatraces blancos (*Zantedeschia aethiopica*) son los más conocidos en nuestro país y son muy aceptados, la introducción de nuevas especies de calas de color también ha causado admiración por su belleza. La introducción de nuevos híbridos de color se espera que genere un nuevo mercado de exportación (Leszczyñska y Borys, 2002). La fertilización es un factor determinante para la producción; por lo tanto, debe ser eficiente y fraccionada para satisfacer las necesidades del cultivo. En este trabajo se evaluó el efecto de diferentes dosis del fertilizante Nitrofoska Novatec Premium en el cultivo de Cala lily amarillo (*Zantedeschia elliottiana*

Engl.). Se consideraron en la evaluación variables del desarrollo vegetativo y variables de fin de cultivo como el peso del rizoma, la longitud y peso de la raíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplearon rizomas de Cala Lily o alcatraz amarillo (*Zantedeschia elliottiana* Engl.), previo a la plantación se desinfectaron por inmersión durante 20 minutos en Benlate® (Benomilo) 1 g·L^{-1}, para posteriormente ser establecidos en un sustrato a base de tierra de hoja, perlita y peat moss en proporciones iguales. Se utilizó un diseño experimental de bloques al azar para evaluar cinco dosis: 0, 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 g·L^{-1} del fertilizante químico Nitrofoska Novatec Premium (15-3-20+2 MgO) en presentación granular, soluble en agua, y cinco repeticiones de cada dosis o tratamiento y cada repetición con dos rizomas. Las aplicaciones del Nitrofoska (15-3-20+2 MgO) se realizaron una vez por semana; las variables de respuesta del desarrollo vegetativo fueron: altura de planta, longitud de tallo, longitud de hoja, ancho de hoja, área foliar. Al terminar el ciclo de cultivo se evaluó: el peso del rizoma, la longitud de la raíz y el peso de la raíz. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de comparación de medias de Duncan ($\alpha \leq 0.10$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables del desarrollo vegetativo. Se efectuó un ANOVA de las variables del desarrollo vegetativo, éste no mostró diferencias significativas (Pr > F); también se hicieron pruebas de medias de Duncan ($\alpha \leq 0.10$) y de igual manera no se encontraron diferencias significativas; sin embargo, resulta interesante describir el comportamiento general del efecto del fertilizante Nitrofoska (15 - 3 - 20 + 2 MgO) en las variables respuesta que muestra el Cuadro 1.

Cuadro 1: Efecto del fertilizante Nitrofoska en las variables vegetativas de Cala Lily amarillo (*Zantadeschia ellottiana* Engl.).

Nitrofoska g L^{-1}	AP cm	LT cm	LH cm	AH cm	AF cm^2
T1–0	48.530 a*	34.633 a	14.067 a	11.467 a	121.19 a
T2–0.5	49.967 a	36.000 a	13.967 a	12.600 a	133.16 a
T3–1.0	52.800 a	36.500 a	16.300 a	12.607 a	154.01 a
T4–1.5	45.067 a	32.467 a	12.600 a	12.533 a	123.90 a
T5–2.0	42.800 a	30.600 a	12.200 a	9.600 a	87.24 a

*Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente, Duncan ($\alpha \leq 0.10$). AP (Altura de la planta), LT (Longitud del tallo), LH (Longitud de hoja), AH (Ancho de hoja), AF (Área foliar)

Al analizar el comportamiento del efecto de las diferentes dosis del fertilizante Nitrofoska (15-3-20+2 MgO) en las variables del desarrollo vegetativo, se observó que el tratamiento testigo T1 (0 g L^{-1}) superó siempre al resultado obtenido con la dosis más alta. Tratamiento (2.0 g L^{-1}). Por otra parte, los valores más altos se obtuvieron en todas las variables vegetativas con el tratamiento intermedio T3 (2 g L^{-1}), finalmente los valores

más bajos en las mismas variables fueron observados con las dosis más altas del fertilizante, el tratamiento T5 (2 g L^{-1}). Lo anterior permite inferir que las plantas con rizoma, como es el caso de Cala Lily amarillo o el alcatraz, requieren de fertilizantes con los tres elementos principales: N, P y K, para producir plantas vigorosas; sin embargo, las dosis aplicadas deben ser estudiadas.

En este trabajo, al aumentar la dosis de fertilización subieron los valores de las variables vegetativas, pero con la dosis más alta, 2 g L^{-1}, la tendencia disminuyó. Esto podría deberse a que las plantas con rizoma son sensibles al exceso de sales, lo cual reduce el enraizamiento y la absorción de agua y nutrimentos. Cruz Castillo *et al.* (2001) mencionan que el número de brotes individuales por maceta se incrementó significativamente por la aplicación de 12-11-18- 3 + 20-30-10 + Organozyma® (compuesto biorregulador natural). Este tratamiento produjo 5.0 brotes individuales por maceta mientras que las plantas testigo tuvieron únicamente 2.9. La aplicación de Organozyma® como tratamientosfoliar influyó en promover los brotes individuales por maceta y puede ser una alternativa a los tratamientos de ácido giberélico (AG) previo a la plantación.

Variables de final del ciclo de cultivo. Se realizaron pruebas de comparación de medias Duncan ($\alpha \leq 0.10$) de las variables peso del rizoma, longitud y peso de raíz, se discutirán en especial las dos primeras, ya que en éstas se encontraron diferencias estadísticas.

Peso del rizoma (g). En el peso del rizoma se encontraron diferencias estadísticas ($\alpha \leq 0.10$) entre el Tratamiento T3 (1 g L^{-1} de Nitrofoska) con 35.503 g de peso de rizoma al comparase con el tratamiento T1 (0 g L^{-1} y T5 2.0 g L^{-1} de Nitrofoska), con valores de 23.690 g y 24.937 g de peso de rizoma respectivamente; el Tratamiento 3 (1 g L^{-1} de Nitrofoska) fue un 33% superior al Tratamiento 1 (0 g L^{-1}). El rizoma es un depósito natural de nutrimentos en las plantas bulbosas; los fotosintatos producidos por la parte aérea durante la temporada de crecimiento son translocados a los órganos de reserva, de tal forma que al momento de la plantación las mayores acumulaciones de N, P y K se encuentran en el rizoma. Debido a que esta variable está estrechamente ligada con el área foliar, se puede decir que, a mayor área foliar, mayor fue el peso del rizoma; este también está ligado a la cantidad de fósforo aplicado, ya que ayuda al crecimiento de raíces, floración y tamaño final del rizoma. Cruz Castillo *et al*. (2001) en un experimento que establecieron observaron que el peso fresco de los tubérculos del cv Cameo (*Zantedeschia albomaculata*) no tuvo efecto significativo debido a la inmersión en Organozyma®, los tubérculos produjeron en promedio 5.6 brotes, los testigos únicamente 4.4 brotes.

Longitud de raíz (cm). En esta variable se encontraron diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Duncan ($\alpha \leq 0.10$) al compararse el Tratamiento 3 (1 g L^{-1} de Nitrofoska) que obtuvo 18.5 cm de longitud de raíz con el Tratamiento 5 con 2 g L^{-1} de Nitrofoska , que presentó una longitud de 10.267 cm. El Tratamiento 3 superó en un 45% al Tratamiento 5. Esto sugiere que una concentración intermedia de Nitrofoska (1 g·L^{-1}) favorece el crecimiento en longitud de raíz, posiblemente debido a una mejor disponibilidad de nutrimentos sin efectos negativos asociados al exceso de fertilizante, lo cual es relevante para optimizar el desarrollo radicular y el aprovechamiento de los recursos del sustrato de cultivo.

Cuadro 2. Efecto del fertilizante Nitrofoska en el peso del rizoma, longitud y peso de raíz de Cala lily o alcatraz amarillo *(Zantadeschia elliottiana* Engl.*)*.

Dosis de Nitrofoska Gramos	P RIZOMA gramos	LR cm	P RAIZ gramos
T1 – 0	23.690 b	15.800 ab	5.213 a
T2 – 0.5	28.683 ab	14.650 ab	10.220 a
T3 – 1.0	35.503 a	18.500 a	9.843 a
T4 – 1.5	26.700 ab	15.133 ab	6.450 a
T5 – 2.0	24.937 b	10.267 b	3.383 a

*Medias con la misma letra dentro de cada columna no difieren estadísticamente, Duncan (α≤0.10). P RIZOMA (Peso del rizoma), LR (Longitud de raíz), P RAIZ (Peso raíz).

CONCLUSIÓN

La dosis de Nitrofoska 1.0 g L^{-1} proporcionó los mayores valores de las variables del desarrollo vegetativo (altura de la planta, longitud del tallo, longitud de la hoja, área foliar, peso del rizoma y longitud de la raíz). En las variables peso del rizoma y peso de la raíz, los valores más altos fueron con 0.5 g L^{-1} de Nitrofoska. En todas las variables, el tratamiento o dosis más alta, 2 g L^{-1} de Nitrofoska fue el que presentó los valores más bajos. De acuerdo con esta investigación, es factible fertilizar el cultivo de Cala Lily amarillo con una dosis de 1 g L^{-1} de Nitrofoska y obtener buenos resultados.

BIBLIOGRAFÍA

Cruz-Castillo J.G., Mendoza-Ramírez J. & Torres-Lima P.A. (2001). Shade, fertilizer and a natural bioregulator to improve *Zantedeschia* growth in a Mexican tropical upland area[1,2]. J. *Agrie. Univ. P.R.* 85(3-4), 135-142. https://www.academia.edu/download/69851957/2605.pdf.

Funell, K. A. (1993). Zantaschia In: De Hertogh, A.; Le Nard, M. The Physiology of flower of bulbs. Elseiver Amsterdam.

Leszczynska-Borys H. & Borys M.W. (2002). La Flora de la Cultura del Estado de Puebla. CONACYT, UPAEP. Puebla México.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2022). *Lista de producción de flores y ornamentales para atender la demanda del 14 de febrero*. https://www.gob.mx/agricultura/prensa/223428.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2023). *Alcatraz*. Monografías de productos agroalimentarios mexicanos. https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/documentos/monografias.

FORTALECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE CHILE JALAPEÑO MEDIANTE NANOPRIMING DE SEMILLAS: MEJORA DEL ESTABLECIMIENTO Y LA RESILIENCIA AL ESTRÉS

Erick H. Ochoa Chaparro[1]; Juan J. Patiño Cruz[1]; Julio C. Anchondo Páez[1]; Cristina L. Franco Lagos[1]; Alan Álvarez Monge[1]; Esteban Sánchez[1]

[1] Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C., Avenida Cuarta Sur No. 3820, Fraccionamiento Vencedores del Desierto 33089, Delicias, Chihuahua, México.

Correo del autor de correspondencia: esteban@ciad.mx

RESUMEN

El uso de nanopartículas (NPs) aplicadas a la producción de plántulas hortícolas ha generado creciente interés, pero su impacto integral en la fisiología vegetal aún requiere mayor exploración. Este estudio evaluó el efecto del nanopriming con ZnO, SiO_2, ZnO+SiO_2 y un nanofertilizante de ZnMo, sobre el perfil fisiológico, fotosintético y bioquímico de plántulas de *Capsicum annuum* L., con el objetivo de fortalecer su calidad para trasplante. Se midieron parámetros morfológicos (biomasa radicular, biomasa aérea, biomasa total, longitud y diámetro de tallo, número de hojas), fotosintéticos (clorofila a, b, total, carotenoides, índice SPAD) y bioquímicos (actividad de nitrato reductasa). Los tratamientos con ZnO y ZnO+SiO_2 promovieron un desarrollo radicular más robusto, mayor contenido de clorofila y SPAD, y una mayor actividad de NR, superando los efectos observados con bioestimulantes comerciales, hydropriming y el control. Estos resultados demuestran que las NPs fortalecen de forma integral procesos clave en las plántulas, generando un perfil fisiológico superior y más funcional para el trasplante. Este trabajo aporta evidencia novedosa sobre el potencial del nanopriming como una estrategia biotecnológica sostenible para mejorar la eficiencia del establecimiento en cultivos hortícolas.

PALABRAS CLAVE: *Asimilación de nitrógeno; chile jalapeño; nanopriming; plántulas; ZnO+SiO_2.*

INTRODUCCIÓN

En las etapas iniciales del desarrollo de *Capsicum annuum* L., el bajo vigor fisiológico puede limitar procesos clave como la eficiencia fotosintética y la asimilación de nitrógeno, lo que repercute negativamente en el crecimiento y la productividad. Estos procesos están estrechamente vinculados, ya que una proporción significativa del nitrógeno foliar se destina a la síntesis de proteínas fotosintéticas como la Rubisco, cuya actividad depende directamente de un suministro adecuado de nitrógeno (Xu *et al.,* 2012).

La enzima nitrato reductasa (NR) actúa como un indicador temprano del estado nutricional de la planta, al catalizar la reducción de nitrato (NO_3^-) a nitrito (NO_2^-), primer paso en la biosíntesis de aminoácidos esenciales. Cuando el metabolismo del nitrógeno se ve limitado, incluso bajo condiciones óptimas de luz y agua, disminuye la funcionalidad fotosintética y el desarrollo se ve comprometido (Shah *et al.,* 2022).

Ante este escenario, el nanopriming se ha propuesto como una técnica innovadora para mejorar la fisiología desde la germinación, mediante el uso de NPs como ZnO y SiO_2. Estas partículas pueden favorecer la imbibición, estimular rutas metabólicas y modular respuestas antioxidantes y enzimáticas desde etapas tempranas del cultivo (Verma *et al.*, 2022). Sin embargo, el efecto combinado de estas NPs sobre pigmentos fotosintéticos y metabolismo del nitrógeno en plántulas de chile jalapeño ha sido escasamente explorado.

Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar el impacto del nanopriming con ZnO, SiO_2 y ZnMo, así como de bioestimulantes comerciales, sobre el contenido de clorofila y la actividad de nitrato reductasa, con el fin de fortalecer la calidad fisiológica para el trasplante.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó de enero a abril de 2025 en el CIAD (Delicias, México), utilizando semillas híbridas de *Capsicum annuum* L. (var. Imperial F1). Las semillas se desinfectaron con NaClO al 4% durante 5 minutos y se enjuagaron con agua destilada, siguiendo el protocolo descrito por Pagani *et al*. (2014). Luego, se imbibieron durante 12 h en soluciones que contenían NPs (ZnO, SiO_2, ZnO+SiO_2) formuladas con quitosano como estabilizante, el nanofertilizante ZnMo comercial y bioestimulantes comerciales.

Los tratamientos aplicados se detallan en el Cuadro 1. Las semillas se sembraron en charolas con sustrato 1:1:1 de vermiculita, perlita y turba, y se mantuvieron bajo condiciones controladas de invernadero. El diseño experimental fue completamente al azar, con ocho tratamientos, tres repeticiones y 100 semillas por repetición.

Cuadro 1. Tratamiento, composición química de los priming y dosis aplicadas en semillas de *Capsicum annuum* L.

Tratamiento	Composición química	Dosis
Control	No aplica	No aplica
Hidropriming	Agua tridestilada	No aplica
NPs ZnO + Q	<50 nm, 99.9% y Poli-D-glucosamina	(100 y 100 mg L^{-1})
NPs SiO_2 + Q	<80 nm, 99.9% y Poli-D-glucosamina	(10 y 100 mg L^{-1})
NPs ZnO + SiO_2 + Q	<50 nm, 99.9%, <80 nm, 99.9% y Poli-D-glucosamina	(100, 10 y 100 mg L^{-1})
NPs Zn + Mo	Solución líquida compuesta por un 62% de Zn, un 5% de Mo y un 5% de un agente quelante a base de extracto de algas.	(124 y 10 mg L^{-1})
Osmoplant®	Solución líquida compuesta por un 6% de aminoácidos libres, un 2.4% de nitrógeno y un 3.3% de potasio.	(2000 mL L^{-1})
Codasil®	Solución líquida con una alta concentración de silicio soluble compuesta por un 20% de silicio, un 4% de aminoácidos libres y un 11.2% de potasio.	(2000 mL L^{-1})

A los 30 días después de la siembra, se seleccionaron 10 plántulas por tratamiento para evaluar variables morfológicas (longitud de raíz y tallo, número de hojas, diámetro de tallo y biomasa fresca). Los pigmentos fotosintéticos (clorofila a, b, total y carotenoides)

se cuantificaron por espectrofotometría en extractos metanólicos, de acuerdo con el método de Wellburn (1994).

El índice SPAD se midió como indicador no destructivo del contenido relativo de clorofila. La actividad de la enzima nitrato reductasa (NR) se determinó mediante el método "*in vivo*" descrito por Jaworski (1971), basado en la reducción de nitrato y su posterior detección colorimétrica. El análisis estadístico incluyó ANOVA y la prueba LSD de Fisher ($p \leq 0.05$), utilizando el software SAS® v9.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variables morfológicas permiten evaluar la calidad estructural de las plántulas, ya que influyen en su estabilidad y capacidad de adaptación postrasplante. En este estudio, se observaron diferencias significativas entre tratamientos para longitud de tallo, número de hojas, diámetro del tallo y biomasa. El tratamiento con Nps de ZnO promovió un incremento del 36% en la biomasa radicular en comparación con el control, seguido por $ZnO+SiO_2$ con un 28% (Figura 1a). Estas formulaciones indujeron una redistribución del crecimiento hacia la raíz, lo cual favorece la absorción de agua y nutrientes, así como la estabilidad mecánica de la plántula. Por el contrario, la biomasa aérea fue mayor en el control, mientras que las NPs generaron una arquitectura más compacta y equilibrada, reduciendo el riesgo de ahilamiento.

Aunque el tratamiento con Hydropriming mostró los mayores valores en longitud (25% superior al promedio general) y diámetro de tallo (24% más que el tratamiento con menor valor), los tratamientos con NPs indujeron un crecimiento más estructurado (Figura 1b).

Las NPs pueden considerarse los tratamientos fisiológicamente más eficientes, ya que priorizan el desarrollo radicular (con aumentos de hasta 36% en biomasa) sin comprometer la biomasa total. Estos resultados coinciden con estudios previos que reportan que el uso de nanomateriales puede modular la morfogénesis, favorecer un crecimiento más balanceado y mejorar la supervivencia en campo al fortalecer la base radicular de las plántulas (Mahakham *et al.,* 2017; Farooq *et al.,* 2012).

Los pigmentos fotosintéticos son marcadores clave del estado fisiológico de las plántulas, ya que participan directamente en la captura de luz y en la protección frente al estrés. En este estudio, el contenido de clorofila total presentó el mayor incremento (36%) en plántulas tratadas con ZnO, en comparación con el control.

Se observaron diferencias significativas en clorofila a, b, total y carotenoides entre tratamientos. Aunque Hydropriming y Osmoplant mostraron mayores niveles de clorofila a, los tratamientos con ZnO y $ZnO+SiO_2$ destacaron en clorofila total y carotenoides, con aumentos de hasta 70%. Estos resultados sugieren que el ZnO puede modular la biosíntesis de pigmentos a través de mecanismos redox y osmóticos (Figura 2). Estudios previos han demostrado que el zinc actúa como cofactor en la síntesis de clorofila y estabilizador estructural de proteínas de los fotosistemas, lo que favorece la

eficiencia fotosintética en condiciones de estrés moderado (Azimi, 2024; Elhefnawy y Elsheery, 2023).

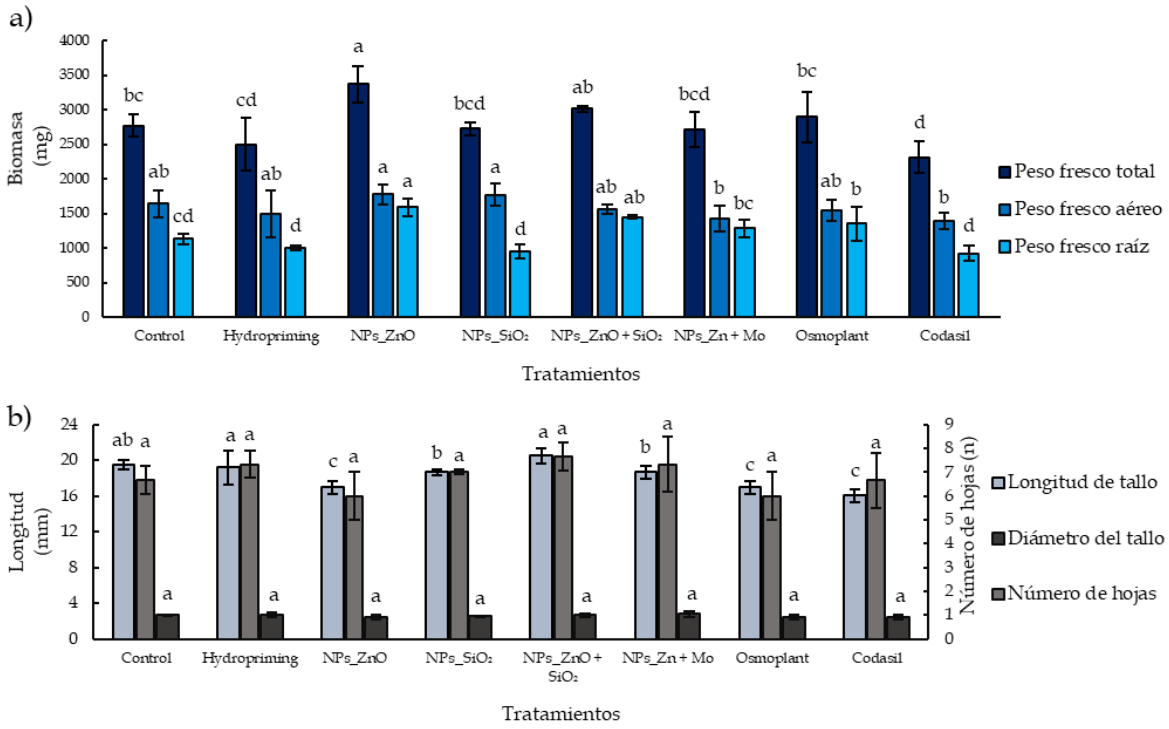


Figura 1. Efecto de diferentes tratamientos de priming en: a) parámetros morfológicos (mm) y número de hojas (n); b) biomasa (mg) de plántulas de *Capsicum annuum* L. Las barras representan la media ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) según la prueba LSD de Fisher.

La acumulación de pigmentos inducida por NPs refuerza su potencial como estrategia para fortalecer la fotosíntesis desde etapas tempranas del cultivo. En contraste, el índice SPAD no presentó variaciones significativas entre tratamientos, lo que sugiere una sensibilidad limitada de esta herramienta para detectar diferencias en el contenido de clorofila en condiciones controladas de invernadero.

La actividad de la enzima nitrato reductasa (NR), encargada de catalizar la conversión de NO_3^- a NO_2^-, es un indicador clave del metabolismo nitrogenado y del estado fisiológico en plántulas. En este estudio, se observaron diferencias significativas entre tratamientos tanto en la NR endógena como inducida.

Los tratamientos con NPs especialmente SiO_2 y $ZnO+SiO_2$, registraron las mayores actividades enzimáticas, superando notablemente al control, mientras que bioestimulantes como ZnMo y Osmoplant mostraron incrementos intermedios. Por el contrario, Codasil e Hydropriming presentaron respuestas más discretas. Este patrón sugiere una estimulación enzimática asociada a la disponibilidad de micronutrientes como el zinc y el silicio, que pueden actuar como cofactores de la NR.

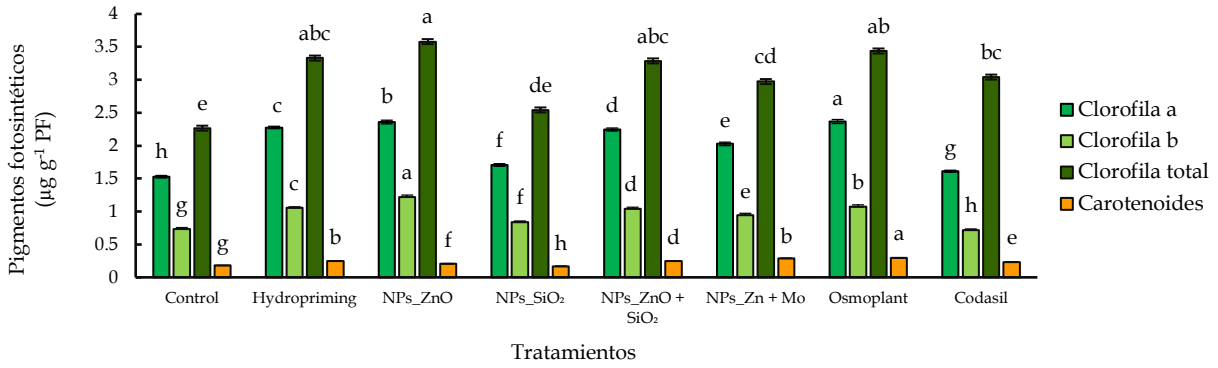


Figura 2. Efecto de diferentes tratamientos de priming en clorofila a, clorofila b, clorofila total y carotenoides en plántulas de *Capsicum annuum* L. Las barras representan la media ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) según la prueba LSD de Fisher.

Estudios previos respaldan esta relación entre NPs y una mayor eficiencia en el uso del nitrógeno, a través de la modulación enzimática y la mejora del entorno redox celular (Nile *et al.*, 2022; Karwat *et al.*, 2019). Los datos indican que el nanopriming no solo mejora el crecimiento morfológico, sino que también fortalece funciones metabólicas esenciales, lo que podría traducirse en una mejor capacidad de adaptación tras el trasplante.

CONCLUSIONES

Este estudio aporta evidencia sólida sobre el efecto positivo del nanopriming con ZnO y ZnO+SiO_2 en el fortalecimiento fisiológico de plántulas de *Capsicum annuum* L. Las NPs favorecieron un desarrollo radicular robusto, estimularon la síntesis de pigmentos fotosintéticos y aumentaron significativamente la actividad de nitrato reductasa, generando un perfil funcional superior al observado con bioestimulantes comerciales, hydropriming y el control.

Estos hallazgos consolidan al nanopriming como una estrategia biotecnológica prometedora para mejorar la calidad del trasplante en cultivos hortícolas y abren nuevas perspectivas para el diseño de prácticas sostenibles enfocadas en la eficiencia fisiológica desde las etapas iniciales del cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

Azimi, R. (2024). Influence of Nanoparticles on Photosynthesis. In *Nanotechnology and Plant Sciences* (pp. 421–439). Taylor & Francis.

Elhefnawy, S. M. & Elsheery, N. I. (2023). Use of nanoparticles in improving photosynthesis in crop plants under stress. In *Photosynthesis* (pp. 105–135). Academic Press.

Farooq, M., Wahid, A. & Siddique, K. H. M. (2012). Micronutrient application through seed treatments—a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 12*(1), 125–142. https://doi.org/10.4067/S0718-95162012000100011

Jaworski, E. G. (1971). Nitrate reductase assay in intact plant tissues. *Biochemical and Biophysical Research Communications, 43*(6), 1274–1279. https://doi.org/10.1016/0006-291X(71)90304-3

Karwat, H., Sparke, M.-A., Rasche, F., Arango, J., Núñez, J., Rao, I., Moreta, D. & Cadisch, G. (2019). Nitrate reductase activity in leaves as a plant physiological indicator of in vivo biological nitrification inhibition by *Brachiaria humidicola*. *Plant Physiology and Biochemistry, 135*, 113–120. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.02.002

Mahakham, W., Sarmah, A. K., Maensiri, S. & Theerakulpisut, P. (2017). Nanopriming technology for enhancing germination and starch metabolism of aged rice seeds using phytosynthesized silver nanoparticles. *Scientific Reports, 7*, 8263. https://doi.org/10.1038/s41598-017-08669-5

Nile, S. H., Thiruvengadam, M., Wang, Y., Samynathan, R., Shariati, M. A., Rebezov, M., Liu, X., Rebezov, M. B. & Kai, G. (2022). Nano-priming as emerging seed priming technology for sustainable agriculture—recent developments and future perspectives. *Journal of Nanobiotechnology, 20*(1), 254. https://doi.org/10.1186/s12951-022-01423-8

Pagani, M. A., Otegui, M. E. & Tognetti, J. A. (2014). Priming enhances emergence and early seedling growth of maize under water stress. *Seed Science and Technology, 42*(1), 1–9. https://doi.org/10.15258/sst.2014.42.1.01

Shah, A. N., Javed, T., Singhal, R. K., Shabbir, R., Wang, D., Hussain, S. & Jaremko, M. (2022). Nitrogen use efficiency in cotton: Challenges and opportunities against environmental constraints. *Frontiers in Plant Science, 13*, 970339. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.970339

Verma, K. K., Song, X. P., Joshi, A., Tian, D. D., Rajput, V. D., Singh, M. & Li, Y. R. (2022). Recent trends in nano-fertilizers for sustainable agriculture under climate change for global food security. *Nanomaterials, 12*(1), 173. https://doi.org/10.3390/nano12010173

Wellburn, A. R. (1994). The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolutions. *Journal of Plant Physiology, 144*(3), 307–313. https://doi.org/10.1016/S0176-1617(11)81192-2

Xu, G., Fan, X. & Miller, A. J. (2012). Plant nitrogen assimilation and use efficiency. *Annual Review of Plant Biology, 63*(1), 153–182. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105532.

MOLECULAR DOCKING BETWEEN (E)-2-(4-FLUOROSTYRYL)-6-HYDRAZINEYLQUINOLINE SENSOR AND *Rhizoctonia solani* FOR ITS DETECTION AND MEASUREMENT IN AGRICULTURAL SOILS

Zianya Gómez Soto[1]; Carlos Ángel Jijón[2;] Josué Esaú Muñoz Pérez[1]; Alfredo Madariaga Navarrete[3]; Giselle Berenice Vela Sancho[4]; Ventura Rodríguez Lugo[1]; Antonio Vázquez Alarcón[5]

[1]Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo - Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Mineral de la Reforma Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5, 42184. Hidalgo, México.

[2] Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica. Tecnológico Nacional de México, Campus Acapulco. Carretera Cayaco - Puerto Marqués, Del P.r.i. s/n, C.P. 39905, Acapulco, Gro., México.

[3] Dirección de investigación. Coordinación de Investigación, desarrollo e innovación. Carretera Pachuca a, Actopan - Pachuca km. 4.5, Campo de Tiro, 42039 Pachuca de Soto, Hgo.

[4] Centro Universitario de Ciencias de la Salud (CUCS), Universidad de Guadalajara, Sierra Mojada 950, Col. Independencia, Guadalajara, 44340, México.

[5] Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos, Carr. Federal México-Texcoco Km 38.5, Universidad Autónoma de Chapingo, 56230 El Cooperativo, Méx.

Correo del autor de correspondencia: antoniovazqueza@gmail.com/go242872@uaeh.edu.mx

ABSTRACT

To assess the effectiveness of a new compound as a phytopatogen sensor to prevent its negative effects in crop production, computational simulation is an alternative to obtain an *a priori* overview. The aim of this study is to use Molecular Docking techniques using UCSF Chimera-1.19-win64.exe. and AutodockTools 1.5.7. To determine the affinity (Kcal mol-1) between *Rhizoctonia solani* and the sensor E)-2-(4-fluorostyryl)-6-hydrazineylquinoline (FHQ), to visualize the intermolecular interactions, Biovia Discovery Studio Visualizer 2024 was employed. The findings revealed a notable distinction in affinity between *Rhizoctonia solani* and FHQ, exhibiting the most stable affinity at -5.1 Kcal mol-1, along with three strong Charge-charge interactions at distances 2.9, 3.01, and 4.56 Å with GLU A:27 and four Pi-Pi Stacked interactions with TRP A:24 3.67, 4.12, 4.26, and 5.63 Å. Changes in binding energy can be identified, indicating that this variation might be seen using optical or spectroscopic methods.

KEYWORDS: *Macromolecular structure; phytopatogen; sensor; simulation*.

INTRODUCTION

The development of chemical sensors for agriculture is a recent area of research that seeks to improve the identification of factors that affect the health of crops, such as plant pathogens, pollutants, or nutrient deficiencies, by early warning. It is crucial to identify plant pathogens promptly and with sensitivity, in order to avoid significant harm and economic consequences (Lucas-Bautista *et al.,* 2022). Fluorescence is a highly efficient means of measuring biological, industrial, and environmental analytes. This technique offers great selectivity, impressive sensitivity, quick photoluminescence responses,

affordability, suitability for bioimaging, and a low detection threshold (Mohammad Abu-Taweel *et al.,* 2024). One compound with this ability is the quinoline, like the (E)-2-(4-fluorostyryl)-6-hydrazineylquinoline (FHQ), which is proposed as a sensor to detect proteins from organisms of interest, such as phytopathogens.

A plant pathogenic fungus of interest is *Rhizoctonia solani*, which is a type of fungus that can be found in soil and seeds, classified under basidiomycetes, and has the ability to exist independently as well as thrive as a decomposer in the ground, and it can cause illness in various annual and persistent fruits, vegetables, industrial, and grain crops (Aydın, 2022). This organism can be identified and measured by assessing the molecular interactions that occur between the FHQ sensor and the *Rhizoctonia solani* agglutinin (RSA), which is a lectin found in the mycelium and sclerotia of the fungus.

During the progress of these investigations, numerous procedures need to be undertaken, which carry a significant risk of unsuccessful outcomes. To mitigate this risk, computational approaches such as Molecular Docking are recommended to gain an initial understanding. This method uncovers potential binding locations and types of interactions between compounds, allowing for the analysis of a wide range of substances in a digital format prior to committing to costly laboratory experiments. It decreases the need for extensive in vitro studies in labs or organisms (*in vivo*) by narrowing down the options, thus conserving both time and resources (Wu *et al.,* 2024; Hossain *et al.,* 2024; Elkhalifa *et al.,* 2023; Murad, Alqurashi, Hussien, 2022).

Based on the above, the aim of this study is to assess the affinity and molecular interactions between the FHQ sensor and the plant pathogen Rhizoctonia using computational tools in order to establish the foundation for a sensing and detection process.

MATERIALS AND METHODS

The FHQ sensor was made with the ChemDraw 20.0 software; its energy was minimized to achieve its structure using ChemDraw 3D 20. 0, and it was saved in the SYBYL2 (. mol2) format. The crystal structure of the RSA (4G9N, Chain A) was downloaded from the RCSB Protein Data Bank PDB in PDB format (RCSB Protein Data Bank, 2025).

To explore the affinity and potential intermolecular interactions. Molecular docking was carried out in UCSF Chimera 1.17.3 and AutoDock Tools 1.17.5 between the target RSA and the FHQ ligand with Center Grid Box: 18.16, -30.38, 9.65, and volume XYZ-dimensions: 70 for Chimera and 26 for AutoDock Tools, and to examine the interactions, the file generated by AutoDockTools (_out.pdbqt) was opened in Biovia Discovery Studio Visualizer 2024, which displays the types of intermolecular interactions, functional groups, and distances established between the receptor and the ligand (Hernandez-Hernandez y Mendoza-Huizar, 2024).

RESULTS AND DISCUSSION

Molecular Docking showed an affinity (Kcal mol^{-1}) medium with conformation (conf) 6 and 7 as best due to its smallest RMSD (Table 1).

Table 1. Affinity scores (Kcal mol^{-1}) obtained by AutodockTools 1.5.7.

Conf	Score (Kcal mol^{-1})	RMSD l.b.	RMSD u.b.
1	-5.9	0.0	0.0
2	-5.4	11.621	12.942
3	-5.3	28.860	30.959
4	-5.3	17.708	19.073
5	-5.2	17.324	18.661
6	-5.1	2.120	3.547
7	-4.9	3.023	3.918
8	-4.9	10.365	12.794
9	-4.8	21.422	22.896

In Figure 1 can be observed the intermolecular interactions and amino acids which make interaction with FHQ. The main intermolecular interactions are Electrostatic: Salt Bridge; Charge-charge between $-N^{+}$ from FHQ and -OH group from GLU A:27 with 2.9, 3.01, and 4.56 Å of distance; Hydrophobic: Pi-Pi Stacked between aromatic rings with 3.67, 4.12, 4.26, and 5.63 Å with TRP A:24, Pi-alkyl with ALA A:33 (4.72, 5.25 Å), and Halogen: Fluorine with GLU A. 121 (3.25 Å).

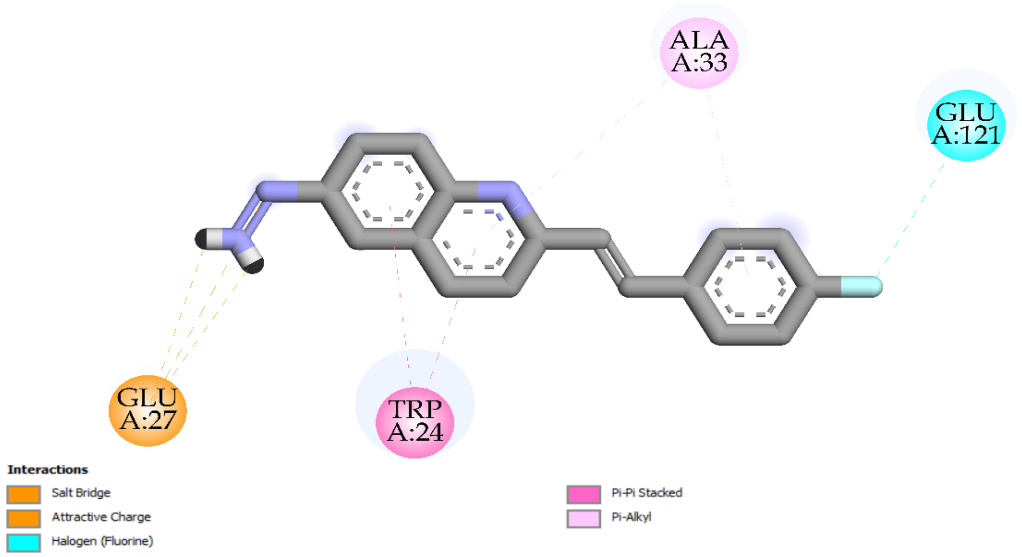


Figure 1. Intermolecular interactions from conf 1 between FHQ and RSA from *Rhizoctonia solani*.

Intermolecular charge-charge interaction refers to a form of electrostatic force that happens between particles that carry a charge, such as ions or molecules that possess overall charges or partial charges. These interactions come from the attraction or repulsion governed by Coulomb's law among charged particles. The energies of their

interactions can reach several hundred kJ mol^{-1}, significantly more intense than hydrogen bonds (approximately 20 kJ mol^{-1}) and dipole forces (Lucjan, 2007). Experimental and computational studies suggest that the strength of typical aromatic pi-pi stacking interactions ranges from about 1 to 5 kcal mol-1, depending on the particular system and the substituents involved (Nishijo *et al.,* 1990).

CONCLUSIONS

Molecular docking using computer simulations is an appropriate method to evaluate how well a new substance can detect specific analytes and organisms relevant to food safety, agricultural productivity, environmental conservation, and healthcare.

BIBLIOGRAPHY

Aydın, M. H. (2022). Rhizoctonia solani and its biological control. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 9(1), 118-135.

Elkhalifa, A. E. O., Banu, H., Khan, M. I. & Ashraf, S. A. (2023). Integrated network pharmacology, molecular docking, molecular simulation, and in vitro validation revealed the bioactive components in soy-fermented food products and the underlying mechanistic pathways in lung cancer. *Nutrients,* 15(18), 3949.

Hernandez-Hernandez, K. M. & Mendoza-Huizar, L. H. (2024). A computational study on the binding and interactions of flavonoids with gliadin using molecular docking. Pädi Basic Sciences and Engineering Scientific Bulletin from ICBI, 12, 13-18. https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial5.13895.

Hossain, M. S., Roney, M., Bin Mohd Yunus, M. Y. & Shariffuddin, J. H. (2024). Virtual screening, molecular docking, molecular dynamics, and MM-GBSA approaches identify prospective fructose-1, 6-bisphosphatase inhibitors from pineapple for diabetes management. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 42(24), 13619-13634. https://doi.org/10.1080/07391102.2023.2276889.

Lucas-Bautista, J. A., Bautista-Baños, S., Ventura-Aguilar, R. I. & Hernández-López, M. (2022). Chitinases in plants and their potential use as biomarkers for the design of biosensors for the detection of phytopathogenic fungi. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(4), 701-713.

Lucjan, P. (2007). Ideas of Quantum Chemistry: Intermolecular Interactions, 681–761. https://doi.org/10.1016/B978-044452227-6/50014-4.

Mohammad Abu-Taweel, G., Alharthi, S. S., Al-Saidi, H. M., Babalghith, A. O., Ibrahim, M. M. & Khan, S. (2024). Heterocyclic organic compounds as a fluorescent chemosensor for cell imaging applications: a review. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 54(7), 2538-2553.

Murad, H. A. S., Alqurashi, T. M. A. & Hussien, M. A. (2022). Interactions of selected cardiovascular active natural compounds with CXCR4 and CXCR7 receptors: A molecular docking, molecular dynamics, and pharmacokinetic/toxicity prediction study. *BMC Complementary Medicine and Therapies,* 22(1), 35.

Nishijo, J., Yonetani, I., Iwamoto, E., Tokura, S., Tagahara, K., & Sugiura, M. (1990). Interaction of caffeine with L-tryptophan: study by 1H nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Journal of Pharmaceutical Sciences,* 79(1), 14-18. http://doi.org/10.1002/jps.2600790105.

RCSB Protein Data Bank (2025). 4G9N pdb_00004g9n, Crystal structure of the Rhizoctonia solani agglutinin in complex with N'-acetyl-galactosamine. Retrieved July 14, 2025. https://www.rcsb.org/structure/4G9N.

Wu, Z., Yang, L., Wang, R., Yang, J., Liang, P., Ren, W. & Yu, H. (2024). Exploring the Mechanism of Asiatic Acid against Atherosclerosis Based on Molecular Docking, Molecular Dynamics, and Experimental Verification. *Pharmaceuticals,* 17(7), 969. https://doi.org/10.3390/ph17070969.

El Suelo: Pasado, Presente y Futuro de la Vida

División VI. Ecología del Suelo y Ciencias de la Tierra

INFLUENCIA DE FUENTES DE CARBONO EN LA COMUNIDAD DE RIZOBACTERIAS DE MAÍZ

Guadalupe Medina de la Rosa[1,2]; Abraham Saavedra Bermúdez[1,3]; Lucía López Reyes[1]; Moisés Graciano Carcaño Montiel[1]; Leticia Gómez Velázquez[1].

[1] Laboratorio de Microbiología de Suelos, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. CP. 72570. Puebla, México.
[2] Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación. CP. 03940. Cd. México, México.
[3] Facultad de Ciencias Químicas-Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. CP. 72570. Puebla, México.
Correo del autor de correspondencia: lucia.lopez@correo.buap.mx

RESUMEN

La producción de exudados radicales funciona como mecanismo de selección de la comunidad microbiana en la rizósfera, donde se favorece la presencia de microorganismos benéficos para el crecimiento y protección de la planta. Comprender la influencia de metabolitos específicos sobre las comunidades bacterianas, ayudaría a favorecer comunidades bacterianas que estimulen el crecimiento y protección de las plantas. En el presente proyecto, bajo condiciones de invernadero, se aplicaron mezclas de ácidos orgánicos (cítrico y málico), aminoácidos (arginina y metionina) y azúcares (melibiosa y xilosa) a la rizósfera de plantas de maíz sembrado en suelo agrícola de San Nicolás de los Ranchos (Puebla) y San José Teacalco (Tlaxcala). La actividad deshidrogenasa del suelo aumentó tras la adición de aminoácidos y disminuyó el pH del suelo de Puebla. De acuerdo con la secuenciación del gen ARNr 16S, en los suelos tratados con metabolitos, se registró la disminución de la diversidad alfa en las comunidades bacterianas, lo que evidencia el proceso de selección en la rizósfera. La influencia de los metabolitos se observó con el análisis multidimensional no métrico donde, además, el pH y la conductividad eléctrica tuvieron un efecto significativo en la composición de la comunidad de rizobacterias. Finalmente, con la adición de metabolitos, se registró un aumento de la abundancia de actinomicetos, el género *Sphingomonas* y la familia Rhizobiaceae, conocidos por su participación en procesos de descomposición de materia orgánica, la producción de fitohormonas y la fijación de nitrógeno, respectivamente.

PALABRAS CLAVE: *ARNr 16S; índice Shannon-Wiener; metagenómica; Zea mays* L.

INTRODUCCIÓN

Los exudados radicales incluyen una gran diversidad de metabolitos, de los cuales los compuestos de carbono de bajo peso molecular como azúcares, ácidos orgánicos y aminoácidos son los más abundantes (Vives-Peris *et al*. 2020; Canarini *et al*. 2019) y los de mayor impacto sobre los microorganismos del suelo (Wiesenbauer *et al*. 2025). Las fuentes de carbono en la rizósfera favorecen la selección de comunidades de bacterias con mecanismos que estimulan el crecimiento vegetal, el control de patógenos o la tolerancia al estrés ambiental (Balasubramanian *et al*. 2020). Por ejemplo, compuestos presentes en

los exudados radicales de maíz como asparagina, ácido aspártico, citrato, malato, sucrosa y xilosa pueden incrementar el reclutamiento de *Azospirillum brasilense*, especie fijadora de nitrógeno (Smercina *et al*. 2019), además de favorecer la actividad fotosintética, el crecimiento de la raíz y la biomasa de la planta (Barbosa *et al*. 2020; Pereira *et al*. 2020). En otras especies de plantas, la aplicación de fuentes de carbono como la ribosa, xilosa, manosa, maltosa, gluconolactona y ribitol favoreció la presencia de bacterias en el suelo, lo que disminuyó el daño por patógenos como *Ralstonia solanacearum* (Wen *et al*. 2023). Además, el ácido málico puede reclutar a *Bacillus subtilis*, cepa que estimula la respuesta sistémica inducida en la planta ante la presencia de la bacteria patógena *Pseudomonas syringae* pv. *tomato* (Rudrappa *et al*. 2008).

Como se puede observar, la composición de las comunidades microbianas en la rizósfera depende en gran medida de los metabolitos liberados al suelo, los cuales podrían favorecer la presencia de bacterias promotoras del crecimiento vegetal. Para estudiar este proceso de selección, se evaluó el cambio en la comunidad bacteriana de la rizósfera de maíz ante ácidos orgánicos, aminoácidos y azúcares por medio de métodos moleculares y la cuantificación de la actividad enzimática del suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se colectaron muestras de suelo de terrenos agrícolas de los municipios de San Nicolás de los Ranchos, Puebla (19°04'13"N 98°27'49"O) y San José Teacalco, Tlaxcala (19°21'06"N 98°02'11"O). El suelo se colectó según la técnica Cinco de Oros, con lo cual se obtuvo una mezcla compuesta de cada zona. Posteriormente, el suelo se tamizó (2 mm) y se realizó la descripción de sus propiedades físicas y químicas de acuerdo con la Norma Oficial NOM-021-2000. Se germinaron semillas de maíz en macetas de 6" con 765 g de suelo a capacidad de campo. Para ello, se sembraron 3 semillas de maíz blanco en cada maceta y después del brote se eliminaron dos plántulas. Las macetas se mantuvieron en invernadero, con riegos cada 48 h. Veinte días después del primer brote de las plántulas, se aplicó una dosis única de los tratamientos: mezcla de ácidos (málico+cítrico), mezcla de aminoácidos (arginina+metionina) y mezcla de azúcares (melibiosa+xilosa) a una concentración de 600 $\mu g\ g^{-1}$. Adicionalmente, se incluyó un testigo donde sólo se agregó agua (n=4). Los tratamientos se realizaron con los suelos provenientes de los dos sitios. Transcurridos dos meses desde el inicio del experimento, las plantas se retiraron. A la par, se colectaron 2 g de suelo pegado a las raíces en tubos Eppendorf y se mantuvieron a -70 °C para los procedimientos moleculares; mientras que el resto del suelo se almacenó a 4 °C.

Análisis del suelo. Se midió el pH y la conductividad eléctrica (CE) del suelo de la rizósfera con el procedimiento de la Norma Oficial Mexicana Nom-021-2000. Para medir la actividad microbiana, se cuantificó la actividad deshidrogenasa del suelo por el método de Thalman que mide la producción de 1,3,5-trifenilformazán (TPF) a partir de cloruro de 2,3,5-trifenil tetrazolio (TTC) (Friedel *et al*. 1994). Se pesó 1 g de suelo en frascos de 30 ml y se agregaron 10 mg de $CaCO_3$, 1 ml H_2O estéril y 1 ml TTC 1%. Se sellaron los frascos, se extrajo el aire y se incubaron (22 h, 30 °C). Posteriormente, se agregaron 25 ml

de alcohol y se incubó 2 h más. La mezcla de centrifugó a 5000 rpm por 5 min y se midió en el espectrofotómetro a 550 nm. Se hizo una curva de calibración de 0 a 40 µg de TTC. Los resultados se reportaron como µg TPF h^{-1} g^{-1} suelo.

Diversidad bacteriana. La extracción de ADN del suelo rizosférico se realizó con el kit Quick-DNA Fecal/Soil Microbe (N6010) de Zymo Research. Posteriormente, se amplificó y secuenció la región V3-V4 del gen ARNr 16S con los cebadores universales 341F y 806R (Yu y Morrison 2004). La secuenciación la realizó el laboratorio NOVOGENE en la plataforma Illumina-Miseq. Las secuencias obtenidas se procesaron con el programa R (V. 4.4.2) y el paquete DADA2 (V. 1.34.0) (Callahan *et al*. 2016). Para la clasificación taxonómica de las Variantes de Secuencia de Amplicón (ASV) resultantes se utilizó la base de datos SILVA del gen ARNr 16S (V. 138.1).

Análisis estadísticos. Los análisis se efectuaron con el programa R (V. 4.4.3) y Rstudio V. 2025.05.0. Se realizó un análisis de varianza de dos vías y prueba de Tukey para evaluar influencia del tipo de metabolito y municipio de origen, sobre la actividad deshidrogenasa, pH y CE. Se obtuvo el índice de diversidad de Shannon-Wiener (microbiome V. 1.26.0) y se realizaron pruebas de varianza (Kruskal-Wallis y Dunn) para comparar la abundancia de taxones por tratamiento. Se realizó un análisis multidimensional no métrico (NMDS) con ajuste de variables del suelo (vegan V. 2.6-8), para evaluar la composición de la comunidad bacteriana entre tratamientos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los suelos utilizados presentaron similitudes según la interpretación basada en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-2000, como un pH moderadamente ácido y textura franco-arenosa, pero una concentración alta de fósforo en el suelo de Puebla (Cuadro 1).

Cuadro 5. Análisis de suelo de los suelos agrícolas de los municipios de San Nicolás de los Ranchos (SNR), Puebla, y San José Teacalco (SJT), Tlaxcala. El análisis se realizó con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-2000.

Municipio	pH	CE	MO	N	P	Ca	Mg	Na	K	DA
		dS m^{-1}	%		mg kg^{-1}		$cmol_c$ kg^{-1}			g m^{-1}
SNR	6.5	0.22	1.97	0.11	213.9	5.6	2.0	1.0	0.3	1.36
SJT	5.5	0.55	0.29	0.06	6.9	4.0	1.6	0.2	0.2	1.96

* CE= Conductividad eléctrica, MO= Materia orgánica, DA= Densidad aparente.

Sólo la mezcla de arginina y metionina redujo el pH de ambos suelos ($p< 0.05$), lo que concuerda con la aplicación de nitrógeno y el consecuente proceso de nitrificación (Xing *et al*. 2022). Además, el aumento en la CE con aminoácidos ($p < 0.05$) sugiere la acumulación de nutrientes y sales (Kumar *et al*. 2020), que podría estar relacionado con un incremento de la actividad microbiana en el suelo ($p < 0.05$, Cuadro 2).

Cuadro 6. Análisis de varianza de la actividad deshidrogenasa (µg TPF g^{-1} h^{-1}), pH y CE (dS·m^{-1}) del suelo.

	Tratamiento	µg TPF g^{-1} h^{-1}	pH	dS m^{-1}
San José Teacalco	Ácidos	1.09 ± 0.11 ab	5.5 ± 0.01 a	0.05 ± 0.00 d
	Aminoácidos	1.21 ± 0.07 a	5.1 ± 0.04 b	0.08 ± 0.00 c
	Azúcares	0.92 ± 0.10 abc	5.5 ± 0.01a	0.04 ± 0.00 d
	Testigo	0.82 ± 0.07 bcd	5.4 ± 0.10 a	0.04 ± 0.00 d
San Nicolás de los Ranchos	Ácidos	0.64 ± 0.08 cd	6.8 ± 0.03 c	0.10 ± 0.00 ab
	Aminoácidos	0.68 ± 0.03 cd	6.5 ± 0.02 d	0.11 ± 0.00 a
	Azúcares	0.62 ± 0.07 cd	6.9 ± 0.03 c	0.11 ± 0.00 a
	Testigo	0.50 ± 0.02 d	6.8 ± 0.02 c	0.08 ± 0.00 bc
ANOVA dos vías	Tratamiento	¥5.58**	28.92***	35.97***
	Municipio	58.43***	2048.28***	432.08***
	Trat. + Mun.			14.35***

TPF: 1,3,5-trifenilformazán; dS= deciSiemens. Los valores corresponden a la media y el error estándar (n=4). Letras similares indican que pertenecen al mismo grupo. ¥ Valor de F y p (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$).

El análisis de varianza indicó que el tipo de metabolito y el origen de las muestras de suelo influyeron de manera significativa sobre la actividad de deshidrogenasa, el pH y la CE ($p < 0.05$), propiedades del suelo que se han relacionado con la composición de las comunidades bacterianas de la rizósfera en otras plantas (López-Lozano *et al*. 2020).

El índice de Shannon-Wiener se utiliza para medir la diversidad de las especies, es decir, el número de especies y su uniformidad en los ecosistemas (Gafan *et al*., 2005). En las muestras de suelo utilizadas, se registró un valor de 6.33±0.03 en el suelo de Puebla y 6.21±0.03 para Tlaxcala ($p < 0.05$). Por su parte, la mezcla de aminoácidos disminuyó de manera significativa el índice de diversidad de 6.36±0.03 a 6.17±0.04, independientemente del origen del suelo ($p < 0.05$). Esto sugiere un proceso de selección de la comunidad bacteriana con la presencia de los metabolitos.

Entre los filos más abundantes de ambos suelos se encuentran, en orden descendente, Actinomycetota, Pseudomonadota y Chloroflexota; todos ellos comunes en suelos de cultivos de maíz (Zhang *et al*., 2020). Además, en el suelo proveniente de Tlaxcala, se encontró al filo Acidobacteriota. Este grupo se encuentra en una amplia variedad de ecosistemas, es versátil en el uso de fuentes de carbono y nutrientes aun bajo condiciones de acidez (Kielak *et al*., 2016). Pseudomonadota contiene una amplia variedad de bacterias con mecanismos que favorecen el crecimiento y protección de las plantas, uno de ellos es el género Sphingomonas, que es capaz de producir fitohormonas (Kumar *et al*., 2020), y el cual tuvo una mayor abundancia en la rizósfera de las plantas de maíz tratadas con la mezcla de aminoácidos ($p < 0.05$).

De acuerdo con el NMDS, la composición de las comunidades bacterianas se modificó según el tipo de mezcla de metabolitos (estrés=0.21; Figura 1). Lo cual se aprecia en el agrupamiento de los puntos de color, puesto que cada uno representa la totalidad de las bacterias identificadas en dicha muestra; esto se observa con mejor detalle en el suelo proveniente de Puebla (Figura 1B), donde destaca un aumento en la abundancia de la familia Rhizobiaceae con la mezcla de ácidos orgánicos y aminoácidos ($p < 0.5$). Dicha familia contiene el orden Rhizobiales que, a su vez, incluye especies de bacterias fijadoras

de nitrógeno (López-Lozano *et al.,* 2020). Además de que se observó un efecto significativo del pH y la conductividad eléctrica sobre las comunidades ($p < 0.01$).

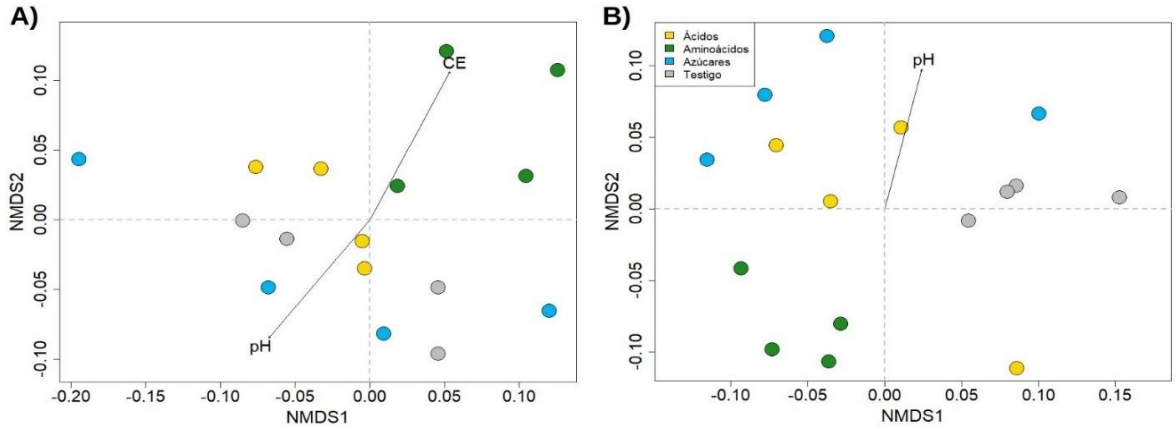


Figura 11. Análisis multidimensional no métrico de las comunidades de bacterias asociadas a la rizósfera de maíz, con ajuste de propiedades del suelo (p<0.01). Las plantas fueron tratadas con ácidos orgánicos, aminoácidos y azúcares. Se utilizó suelo de A) San José Teacalco, Tlaxcala (Estrés=0.11) y B) San Nicolás de los Ranchos, Puebla (Estrés=0.21).

CONCLUSIONES

La mezcla de arginina y metionina tuvo el mayor efecto en las propiedades del suelo y las comunidades bacterianas de la rizósfera; incrementó la actividad microbiana del suelo, disminuyó la diversidad alfa y favoreció la presencia de bacterias de los filos Actinobacteria y Pseudomonadota, taxones que incluyen especies con mecanismos de promoción de crecimiento vegetal. Conocer los metabolitos que favorecen la presencia de microorganismos benéficos ayudaría a desarrollar estrategias que mejoran el crecimiento de las plantas y ayuden en el control de enfermedades o plagas.

AGRADECIMIENTOS

A SECIHTI por la beca otorgada por el programa Estancias Posdoctorales por México 2022 (1), CUV 626209. A la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP-BUAP2024 100155588) y al programa BIOFERTIBUAP®.

BIBLIOGRAFÍA

Balasubramanian, V., Sur, A., Nayak, K.K. & Singh, R.K. (2020). Plant Root Exudates as Determinant of Rhizomicrobiome. En: Sharma SK, *et al*., Eds. Rhizosph microbes, Microorg Sustain. Singapore: Springer; p. 105–126.

Barbosa, M.S., Rodrigues, E.P., *et al*. (2020). Root exudate-supplemented inoculant of *Azospirillum brasilense* Ab-V5 is more effective in enhancing rhizosphere colonization and growth of maize. *Environ. Sustain.* 3(2):187–197.

Callahan, B.J., McMurdie, P.J., Rosen, M.J., Han, A.W., Johnson, A.J.A. & Holmes, S.P. (2016). DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data. *Nat Methods,* 13(7):581–583.

Canarini, A., Kaiser, C., Merchant, A., Richter, A. & Wanek, W. (2019). Root Exudation of Primary Metabolites: Mechanisms and Their Roles in Plant Responses to Environmental Stimuli. Front Plant Sci. 10:157.

Friedel, J.K., Molter, K., Fischer, W.R. (1994). Comparison and improvement of methods for determining soil dehydrogenase activity by using triphenyltetrazolium chloride and iodonitrotetrazolium chloride: Springer.

Gafan, G.P., Lucas, V.S., Roberts, G.J., Petrie, A., Wilson, M. & Spratt, D.A. (2005). Statistical analyses of complex denaturing gradient gel electrophoresis profiles. *J. Clin. Microbiol.*, 43(8):3971–8.

Kielak, A.M., Barreto, C.C., Kowalchuk, G.A., van Veen, J.A. & Kuramae, E.E. (2016). The Ecology of Acidobacteria: Moving beyond Genes and Genomes. *Front Microbiol.,* 7:1–16.

Kumar, A., Singh, S., Gaurav, A.K., Srivastava, S. & Verma, J.P. (2020). Plant Growth-Promoting Bacteria: Biological Tools for the Mitigation of Salinity Stress in Plants. Front Microbiol. 11.

López-Lozano, N.E., *et al*., (2020). Bacterial Diversity and Interaction Networks of *Agave lechuguilla* Rhizosphere Differ Significantly from Bulk Soil in the Oligotrophic Basin of Cuatro Cienegas. *Front Plant Sci.* 11:1028.

Pereira, L.C., Bertuzzi-Pereira, C., *et al*., Braccini AL. (2020). Corn Responsiveness to Azospirillum: Accessing the Effect of Root Exudates on the Bacterial Growth and Its Ability to Fix Nitrogen. *Plants,* 9(7):923.

Rudrappa, T., Czymmek, K.J., Pare, P.W., Bais, H.P. (2008). Root-Secreted Malic Acid Recruits Beneficial Soil Bacteria. *Plant Physiol,* 148(3):1547–1556.

Schmidt, J.E., Kent, A.D., Brisson, V.L. & Gaudin, A.C.M. (2019). Agricultural management and plant selection interactively affect rhizosphere microbial community structure and nitrogen cycling. *Microbiome,* 7(1):146.

Smercina, D.N., Evans, S.E., Friesen, M.L. & Tiemann, L.K. (2019). To Fix or Not to Fix: Controls on Free-Living Nitrogen Fixation in the Rhizosphere. Appl Environ Microbiol. [accessed 2019 Oct 8] 85(6): e02546-18.

Vives-Peris, V., de Ollas, C., Gómez-Cadenas, A. & Pérez-Clemente, R.M. (2020). Root exudates: from plant to rhizosphere and beyond. *Plant Cell Rep.* 39(1):3–17.

Wen, T., Xie, P., Liu, H., Liu, T., Zhao, M., Yang, S., Niu, G., Hale, L., Singh, B.K., Kowalchuk, G.A., *et al*. (2023). Tapping the rhizosphere metabolites for the prebiotic control of soil-borne bacterial wilt disease. *Nat Commun.* 14(1):4497.

Wiesenbauer, J., *et al*. (2025). Preferential use of organic acids over sugars by soil microbes in simulated root exudation. *Soil Biol Biochem.* 203(September 2024):109738.

Xie, S., Jiang, L., Wu, Q., Wan, W., Gan, Y., Zhao, L. & Wen, J. (2022). Maize Root Exudates Recruit Bacillus amyloliquefaciens OR2-30 to Inhibit *Fusarium graminearum* Infection. *Phytopathology®.* 112(9):1886–1893.

Xing, W., Lu, X., Ying, J., Lan, Z., Chen, D. & Bai, Y. (2022). Disentangling the effects of nitrogen availability and soil acidification on microbial taxa and soil carbon dynamics in natural grasslands. *Soil Biol Biochem.* 164:108495.

Yu, Z. & Morrison, M. (2004). Comparisons of different hypervariable regions of *rrs* genes for use in fingerprinting of microbial communities by PCR-denaturing gradient gel electrophoresis. *Appl Environ Microbiol*. 70(8):4800–6.

DESCOMPOSICIÓN DE RESIDUOS VEGETALES EN BOSQUES TROPICALES SECOS DEL NOROESTE DE MÉXICO: COMPARACIÓN ENTRE SECO-FRÍO Y TRANSICIÓN SECO-HÚMEDO

Cinthia Lizbeth Báez Gaxiola[1]; Jesús Adrián Bojórquez Valdez[1]; Juan Carlos Álvarez Yépiz[1]; Zulia Mayari Sánchez Mejía[1]

Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de febrero 818 sur colonia Centro 85000, Ciudad Obregón, Sonora, México.

Correo del autor de correspondencia: cinthia.baez208189@potros.itson.edu.mx

RESUMEN

La descomposición de los residuos vegetales es esencial para el reciclaje de nutrientes en los ecosistemas, particularmente en el bosque tropical seco (BTS), donde la marcada estacionalidad influye en su dinámica de descomposición. Durante la temporada seca-fría, la restricción hídrica inhibe la actividad biológica, incidiendo negativamente en la descomposición, mientras que con el periodo de transición seca-húmeda se estimula este proceso. Este estudio evaluó la descomposición de los residuos vegetales en una cronosecuencia de BTS promovidos por la helada severa en Álamos, Sonora. Se seleccionaron tres estados de sucesión del bosque (dos de condición Temprana, una Intermedia, y una Madura) y se compararon las tasas de descomposición (*k*) durante dos periodos estacionales mediante bolsas de descomposición con residuos vegetales locales, enterradas en el suelo durante tres meses en el periodo seco-frío y seis meses en la transición seco-húmedo. Los valores de *k* para cada condición se calcularon mediante un modelo exponencial basado en la proporción de masa remanente, y se aplicó un ANOVA de una vía con combinaciones de sitio y periodo. Los resultados indicaron diferencias significativas de *k* en las condiciones Temprano-I y Maduro, mientras que Temprano-BM e Intermedio no presentaron diferencias. En todas las condiciones se presentó una disminución de la masa con el tiempo, siendo más marcada en Temprano-I (31.5% remanente) y menor en Maduro (45.5%). La *k* no siguió un patrón lineal con la edad del bosque. Factores locales como la composición química de los residuos vegetales y la estacionalidad influyen en esta función ecosistémica.

PALABRAS CLAVE: *Cambio climático; suelo; sucesión ecológica; .*

INTRODUCCIÓN

La descomposición de los residuos vegetales es la principal fuente de energía de los ecosistemas terrestres, ya que influye directamente en cómo se transforman, almacenan y liberan los nutrientes contenidos en este estrato orgánico (Throop *et al.,* 2025; Bonilla *et al.,* 2008).

A nivel regional, el proceso de descomposición es controlado por factores como la precipitación, temperatura y factores locales como la edad sucesional de los bosques, la

calidad química de los residuos vegetales (composición química) y la actividad de los organismos saprobios (Morffi-Mestre *et al.,* 2023).

En los bosques tropicales secos (BTS) la acumulación de residuos vegetales en el suelo es alta debido a la caída de hojarasca (Anaya *et al.,* 2007) y su tasa de descomposición (k) baja durante la estación seca, ya que estas condiciones inhiben este proceso por la restricción hídrica y actividad biológica del suelo (Sanches *et al.,* 2008). Una de las características más notables del BTS es su alta estacionalidad: presenta una temporada seca de hasta 8 meses, durante la cual cerca del 70% de los árboles pierden sus hojas favoreciendo la acumulación de los residuos vegetales; y una temporada húmeda de ~4 meses, donde se presentan picos de verdor después de las primeras precipitaciones, las cuales promueven la descomposición y la activación del reciclaje de nutrientes (Murphy y Lugo, 1986). Esta variación estacional genera contrastes importantes en el proceso de descomposición, al afectar la actividad microbiana y la fragmentación de los residuos vegetales, procesos esenciales para su descomposición (Allison y Treseder, 2008).

En el noroeste de México, el BTS de Álamos, Sonora, representa parte del límite norte de distribución de este bioma en el continente americano (Bojórquez *et al.*, 2025). Además de la marcada estacionalidad, este ecosistema ha sido afectado por eventos climáticos extremos, como la helada severa de febrero de 2011, que provocó mortandad extensiva de árboles tanto en bosques maduros como secundarios, alterando la configuración del paisaje (Bojórquez *et al.,* 2021). Este disturbio modificó la estructura vegetal y generó una cronosecuencia de sitios con distintas edades de sucesión (Bojórquez *et al.,* 2019). Estos cambios en la cobertura vegetal y la calidad de los residuos vegetales podrían influir en el proceso de descomposición, al alterar las condiciones microambientales y la disponibilidad de sustrato para la fauna y organismos descomponedores.

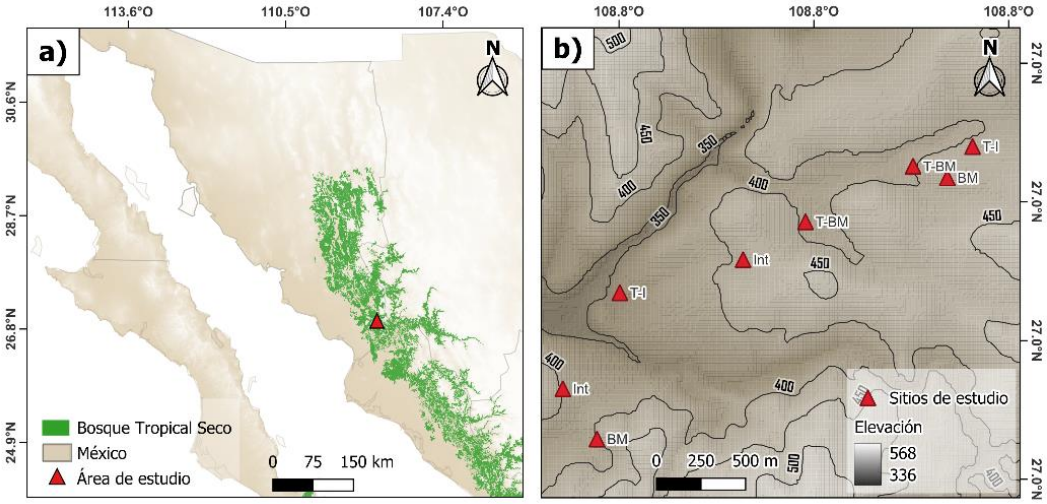
Considerando estas condiciones, estudiar la descomposición de los residuos vegetales en esta cronosecuencia ofrece una oportunidad única para entender cómo la estacionalidad y el historial de perturbación influyen en esta función ecosistémica. En este trabajo se comparan las tasas de descomposición del mantillo durante el periodo seco-frío y la transición seco-húmedo con el inicio de las lluvias en tres estados de sucesión dentro del BTS de Álamos, Sonora, para entender su variación temporal y espacial a lo largo de dicho gradiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el BTS ubicado al sur de Sonora, dentro de los predios de la Reserva Monte Mojino en los límites del Área de Protección de Flora y Fauna Sierra de Álamos–Río Cuchujaqui. Esta región presenta un clima cálido semiárido, con una precipitación media anual de 706 mm, concentrada principalmente entre julio y octubre, donde más del 70% de las precipitaciones suceden debido al evento del Monzón de Norteamérica y una temperatura promedio de 24 °C (Bojórquez *et al.,* 2021). Se seleccionaron tres estados sucesionales que conforman una cronosecuencia de BTS influenciada por la helada de 2011 y el historial de uso de suelo previo al disturbio. La cronosecuencia incluyó dos sitios en sucesión temprana (11-13 años), diferenciados por su estado previo al disturbio: Temprano–I (antes bosque intermedio) y Temprano–BM

(antes bosque maduro), además de un sitio Intermedio (32–52 años) y uno Maduro (>100 años). Para cada tipo de bosque se establecieron dos sitios y en ellos tres parcelas (20 × 20 m) en diferentes posiciones de pendiente. Este marco conceptual forma parte de RETROSECE (Respuesta del Ecosistema Tropical Seco a Eventos Climáticos Extremos), una iniciativa de monitoreo a largo plazo que evalúa el impacto de disturbios como heladas sobre la dinámica y funciones del ecosistema.

Figura 1. a) Ubicación del área de estudio y distribución de Bosque Tropical Seco. b)



Localización de sitios de estudio RETROSECE en Álamos, Sonora. Se utilizan las siguientes abreviaciones: T-BM = Temprano-BM; T-I = Temprano-I; Int = Intermedio; BM = Maduro.

Para estimar la tasa de descomposición de los residuos vegetales, se utilizaron bolsas de descomposición confeccionadas con malla de nylon, cada una con 5 gramos de mantillo recolectado localmente. Dando un total de 24 bolsas por estadio sucesional, las cuales se enterraron entre 10 y 15 cm de profundidad para mantener condiciones edáficas más estables, bajo una menor exposición a las fluctuaciones extremas de temperatura y humedad de la superficie. Se recuperaron después de un periodo de tres (enero-abril) y seis meses (enero-julio). Este procedimiento se repitió en dos momentos distintos: durante el periodo seco-frío (P1) y la transición seco-húmedo (P2), con el fin de comparar la dinámica de descomposición bajo condiciones contrastantes de humedad.

Las tasas de descomposición (k) se calcularon con base en el modelo exponencial propuesto por Olsen (1963), utilizando la proporción de masa remanente al final del periodo de incubación: $k\ (meses^{-1}) = \frac{-ln\frac{Xt}{Xo}}{t}$ donde X_t= Cantidad de masa remanente en el tiempo (g); X_0= Cantidad de muestra inicial (g); t= tiempo transcurrido (meses). Para identificar diferencias significativas entre las k de los sitios en la cronosecuencua se realizó un ANOVA y su respectiva prueba post hoc de Tukey ($p < 0.05$)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tasa de descomposición (k) tendió a disminuir con la madurez del bosque, con valores más altos en las etapas tempranas que en los estadios Intermedio y Maduro (Cuadro 1). En el periodo seco-frío (P1), k varió entre 0.087 meses^{-1} (Maduro) y 0.168 meses^{-1} (Temprano-BM), mientras que en la transición seco-húmedo (P2) aumentó en todos los sitios, alcanzando 0.234 meses^{-1} en Temprano-I y 0.139 meses^{-1} en el Maduro. (Vargas-Terminel *et al.,* 2022; Anaya *et al.,* 2012). Sin embargo, la respuesta a la estacionalidad no mostró un patrón claro ligado a la edad sucesional o a la perturbación previa, lo que sugiere la influencia de otros factores locales como la composición de especies, calidad del mantillo, condiciones microambientales e historia de uso del bosque (Morffi-Mestre *et al.,* 2023).

Cuadro 1. Promedio de la tasa de descomposición (*k*) del mantillo (± DE: desviación estándar) en tres condiciones del bosque tropical seco durante dos periodos climáticos: periodo seco-frío (P1) y la transición seco-húmedo (P2). Diferencias significativas se indican con letras distintas (ANOVA y prueba de Tukey, $p < 0.05$)

Sitio	Periodo	Promedio de *k*	±DE	Comparación post hoc (Tukey)
Temprano-BM	P1	0.168	0.176	ab
	P2	0.187	0.143	
Temprano-I	P1	0.144	0.128	a
	P2	0.234	0.151	
Intermedio	P1	0.148	0.136	ab
	P2	0.157	0.123	
Maduro	P1	0.087	0.044	b
	P2	0.139	0.061	

De forma consistente con estos resultados, la masa remanente de los residuos vegetales disminuyó progresivamente en todos los sitios conforme avanzó el tiempo de incubación. Después de seis meses, el bosque Temprano-I presentó la pérdida más rápida y mayor, con solo un 31.5% de masa remanente, mientras que el sitio Maduro conservó el 45.5% del material inicial. Este patrón respalda los valores de *k* observados, ya que los sitios jóvenes mostraron las tasas de descomposición más elevadas. La mayor velocidad de pérdida de masa en las etapas tempranas de la sucesión podría estar relacionada con una mejor calidad del mantillo, caracterizada por hojas menos recalcitrantes, pues estas requieren más tiempo para descomponerse y pueden afectar las tasas de descomposición (García-Osorio *et al.,* 2020) (Figura 2).

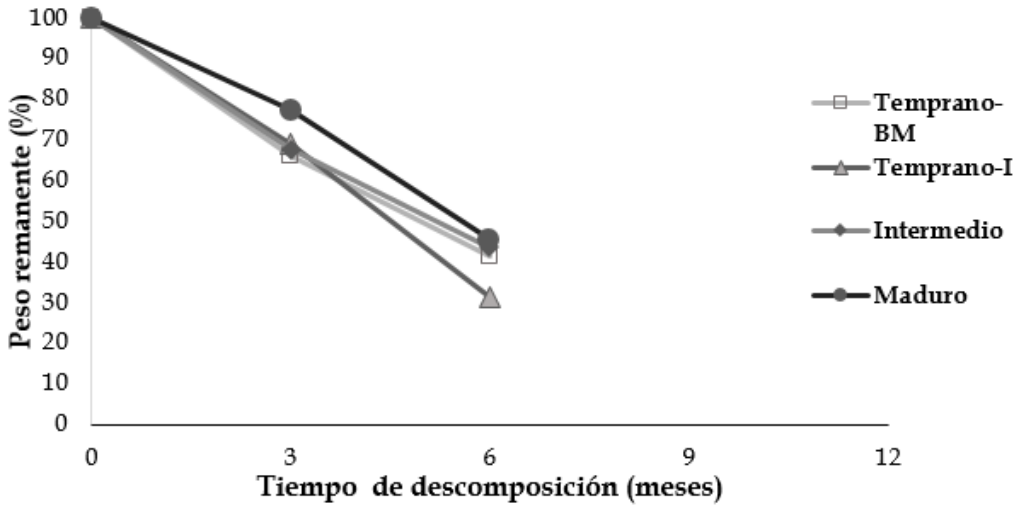


Figura 2. Porcentaje de masa remanente del mantillo a lo largo del tiempo en el bosque tropical seco con distinto estado de sucesión. Cada punto representa la masa remanente (%) y las líneas conectan los valores por condición. La descomposición se evaluó a los 0, 3 y 6 meses mediante bolsas de descomposición.

CONCLUSIONES

La tasa de descomposición de los residuos vegetales en el BTS mostró respuestas variables a los cambios estacionales a lo largo de la cronosecuencia. Sin embargo, el efecto de la edad del bosque no fue lineal, ya que tanto la condición Temprano-I como Maduro presentaron incrementos significativos en la descomposición durante el inicio de la transición seca-húmeda, este patrón no fue igual en las demás condiciones. Estos resultados muestran la importancia de la estacionalidad y su efecto en la descomposición, sugiriendo que, además del estado de sucesión, factores locales como la calidad de los residuos vegetales, la cobertura del dosel, condiciones microambientales, historia de uso del suelo, entre otras variables bióticas y abióticas, influyen en la dinámica de descomposición.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se llevó a cabo mediante el financiamiento de los Proyectos CONACYT 36971 Ciencia-Básica, CONACYT CB2016-286494-T Ciencia-Básica y el proyecto de ITSON PROFAPI –2025. Gracias por el apoyo de CONANP y NCI.

BIBLIOGRAFÍA

Allison, S. D. & Treseder, K.K. (2008). Warming and drying suppress microbial activity and carbon cycling in boreal forest soils. *Global Change Biology*, 14(12), 2898-2909.

Álvarez-Yépiz, J. C., Martínez-Yrízar, A., Búrquez, A. & Lindquist, C. (2008). Variation in vegetation structure and soil properties related to land use history of old-growth and secondary tropical dry forests in northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 256(3), 355-366.

Álvarez-Yépiz, J.C. (2020). Restoration ecology in the Anthropocene: learning from responses of tropical forests to extreme disturbance events. *Restoration Ecology*, *28*(2), 271–276.

Anaya, C.A., García-Oliva, F. & Jaramillo, V.J. (2007). Rainfall and labile carbon availability control litter nitrogen dynamics in a tropical dry forest. *Oecologia*, *150*(4), 602–610. https://doi.org/10.1007/s00442-006-0564-3.

Anaya, C.A., Jaramillo, V.J., Martínez-Yrízar, A. & García-Oliva, F. (2012). Large Rainfall Pulses Control Litter Decomposition in a Tropical Dry Forest: Evidence from an 8-Year Study. *Ecosystems*, *15*(4), 652–663. https://doi.org/10.1007/s10021-012-9537-z.

Bojórquez, A., Álvarez-Yépiz, J.C., Búrquez, A. & Martínez-Yrízar, A. (2019). Understanding and predicting frost-induced tropical tree mortality patterns. Global change biology, 25(11), 3817-3828.

Bojórquez, A., López-Castro, G., Garatuza-Payán, J., Sánchez-Mejía, Z. M., Tarin, T., Yépez, E. A. & Álvarez-Yépiz, J. C. (2025). Assessing aboveground carbon density with field observations and biophysical and spectral predictors in the northmost Neotropical dry forest. *Trees, Forests and People*, *20*. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100844

Bojórquez, A., Martínez-Yrízar, A. & Álvarez-Yépiz, J.C. (2021). A landscape assessment of frost damage in the northmost Neotropical dry forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, *308–309*. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108562.

Bonilla, R., Roncallo, B., Jimeno, J. & García, T. (2008). Artículo científico Leaf litter production and decomposition of native forest and Leucaena sp. systems in Codazzi, Cesar. En *Revista Corpoica-Ciencia y Tecnología Agropecuaria* (Vol. 9, Número 2).

García-Osorio, M.T., Plascencia-Escalante, F.O., Ángeles-Pérez, G., Montoya-Reyes, F. & Beltrán-Rodríguez, L. (2020). Producción y tasa de descomposición de hojarasca en áreas bajo rehabilitación en el porvenir, Hidalgo, méxico. Madera Y Bosques, 26(3). https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632099

Morffi-Mestre, H., Ángeles-Pérez, G., Powers, J. S., Andrade, J. L., Feldman, R. E., May-Pat, F., Chi-May, F. & Dupuy-Rada, J. M. (2023). Leaf litter decomposition rates: influence of successional age, topography and microenvironment on six dominant tree species in a tropical dry forest. *Frontiers in Forests and Global Change*, *6*. https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1082233.

Murphy, P. G. & Lugo, A. E. (1986). Ecology of Tropical Dry ECOLOGY OF TROPICAL DRY FOREST1. En *Source: Annual Review of Ecology and Systematics* (Vol. 17).

Olson, J.S. (1963). Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. Ecology 44(2):322-331.

Sanches, L., Valentini, C. M. A., Pinto Júnior, O. B., Nogueira, J. de S., Vourlitis, G. L., Biudes, M. S., da Silva, C. J., Bambi, P. & Lobo, F. de A. (2008). Seasonal and interannual litter dynamics of a tropical semideciduous forest of the southern Amazon Basin, Brazil. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *113*(4). https://doi.org/10.1029/2007JG000593.

Throop, H. L., Li, J., Moorhead, D. L., Reed, S. C., Todd-Brown, K. E. O., Besser, A. C., Bloom, D. E., Ingalls, T. C. & Cueva, A. (2025). Scaling from microsite to landscape to resolve litter decomposition dynamics in globally extensive drylands. *Functional Ecology*. https://doi.org/10.1111/1365-2435.70029.

Vargas-Terminel, M.L., Flores-Rentería, D., Sánchez-Mejía, Z.M., Rojas-Robles, N.E., Sandoval-Aguilar, M., Chávez-Vergara, B., Robles-Morua, A., Garatuza-Payan, J. & Yépez, E. A. (2022). Soil Respiration Is Influenced by Seasonality, Forest Succession and Contrasting Biophysical Controls in a Tropical Dry Forest in Northwestern Mexico. *Soil Systems*, *6*(4). https://doi.org/10.3390/soilsystems6040075.

d^{15}N y C:N REVELAN TRAYECTORIAS DESACOPLADAS EN MANTILLO Y SUELO TRAS UNA QUEMA PRESCRITA

Nadia Silvana Santini González[1,2]; Bruno Chávez Vergara[1,2]; María del Mar Ruiz Rojas[3]; Nancy Gálvez Reyes[4]; Shatya Quintero Gradilla[5]

[1] Instituto de Geología, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.
[2] Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.
[3] Universidad Autónoma Metropolitana, Calzada del Hueso, Villa Quietud, C.P. 04960, Coyoacán, Ciudad de México, México.
[4] Instituto de Ecología, Circuito exterior s/n anexo al Jardín Botánico, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.
[5] Centro Universitario de la Costa Sur, Av. Independencia Nacional 151, Centro, C.P. 48900, Autlán de Navarro, Jalisco.

Correo del autor de correspondencia: nadiasilvana@geologia.unam.mx

RESUMEN

Se evaluaron los cambios en las propiedades biogeoquímicas del mantillo y del suelo antes, un día y un año después de una quema prescrita en la Reserva de la Biosfera Sierra de Manantlán, México. Se hipotetizó que el fuego induciría cambios inmediatos en el pH, la relación C:N y la composición isotópica del mantillo, mientras que el suelo respondería más lentamente debido a la baja intensidad del incendio. Se midieron el pH, la concentración de carbono y nitrógeno (%C, %N), la relación C:N y los isótopos estables $\delta^{15}N$ y $\delta^{13}C$. Un día después de la quema, el pH del mantillo incrementó de 4.86 ± 0.09 a 8.39 ± 0.43 ($p < 0.0001$). La $\delta^{15}N$ mostró un enriquecimiento de -3.67 ± 0.82 ‰ a -0.33 ± 0.86 ‰; no obstante, un año postquema la $\delta^{15}N$ disminuyó significativamente hasta -1.46 ± 0.99 ‰ ($p < 0.05$). La relación C:N disminuyó de 44.31 ± 2.69 a 20.66 ± 2.56 un día postquema, pero incrementó a 84.30 ± 10.52 un año después de la quema ($p < 0.0001$). En contraste, el pH del suelo no aumentó un día después de la quema, pero disminuyó a 5.94 ± 0.20 un año posterior a la quema. En el suelo, la $\delta^{15}N$ mostró un enriquecimiento sostenido. El fuego prescrito indujo alteraciones inmediatas en el mantillo, reflejadas en cambios en el pH, la concentración de carbono y nitrógeno, la relación C:N y enriquecimiento en $\delta^{15}N$, mientras que el suelo mostró una respuesta más gradual, particularmente en la $\delta^{15}N$. Se sugiere el monitoreo a largo plazo y el uso de isótopos estables para comprender los efectos del fuego en ecosistemas forestales.

PALABRAS CLAVE: *Bosques templados; Cambisol; Cronosecuencia; Isótopos estables; Sierra de Manantlán.*

INTRODUCCIÓN

La quema prescrita se define como el uso intencional y controlado del fuego en condiciones climáticas favorables, con el propósito de alcanzar objetivos de manejo forestal, tales como la reducción de la carga de combustible y la conservación de la

estructura del bosque. Factores como la intensidad del fuego, el tipo de vegetación, la topografía, y las propiedades edáficas, influyen en respuestas de la estructura vegetal, la dinámica de nutrientes y las propiedades del suelo ante una quema prescrita. De esta manera, los efectos del fuego sobre los procesos edáficos no deberían generalizarse (Wang *et al*., 2021).

Las quemas prescritas inducen transformaciones físicas y químicas en el mantillo y el suelo. Se ha documentado un aumento en el pH por la deposición de cenizas alcalinas, la pérdida de carbono y nitrógeno por combustión, así como cambios en la disponibilidad de nutrientes (Fontúrbel *et al*., 2021). El fuego también puede afectar la estructura del suelo al consumir aglutinantes orgánicos, aumentando la densidad aparente y reduciendo la tasa de infiltración de agua (Huber *et al*., 2013).

El origen del mantillo también determina la dinámica de nutrientes. Materiales con una alta relación C:N, como las ramas, se descomponen lentamente, retrasando la liberación de nutrientes. En contraste, el mantillo proveniente de especies latifoliadas, con menor contenido de lignina y bajas relaciones C:N, presenta tasas de descomposición más rápidas. Estas diferencias podrían dar lugar a dinámicas biogeoquímicas desacopladas entre mantillo y suelo, poco documentadas en incendios de baja intensidad (Su *et al*., 2022).

Los isótopos estables $\delta^{15}N$ y $\delta^{13}C$ permiten rastrear procesos biogeoquímicos posteriores al incendio, ya que reflejan transformaciones como la pérdida de compuestos orgánicos volátiles durante la combustión (volatilización) y los cambios inducidos por el metabolismo microbiano en la materia orgánica remanente (Alfaro-Sánchez *et al*., 2016). En este estudio se evaluaron los cambios en las propiedades biogeoquímicas del mantillo y el suelo superficial (0–5 cm) a lo largo de una cronosecuencia de quema prescrita (antes, un día y un año después de la quema) en un bosque montano. Se hipotetizó que el fuego induciría cambios inmediatos en las propiedades biogeoquímicas del mantillo, incluyendo aumentos en pH y $\delta^{15}N$, así como una disminución en la relación C:N, mientras que el suelo respondería más lentamente debido a la baja intensidad del incendio prescrito y a la protección que le brinda la capa de mantillo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El estudio se realizó en la Reserva de la Biósfera Sierra de Manantlán, ubicada entre Jalisco y Colima, México. El clima es cálido subhúmedo (Aw), con lluvias de junio a septiembre y una precipitación anual de ~1,700 mm. La temperatura media anual oscila entre 16 y 22 °C. La vegetación dominante está compuesta por *Pinus douglasiana*, *Arbutus xalapensis* y *Fraxinus uhdei*. El suelo está clasificado como Cambisol bajo manejo silvícola.

La quema prescrita tuvo lugar en el ejido Ahuacapán, donde los incendios son frecuentes y de baja intensidad, con un intervalo de retorno de entre 4 a 7 años. Se quemaron 7.3 ha en un rodal forestal durante ~10 h, como parte de una quema de reducción de material combustible. La temperatura de la flama alcanzó poco más de 439 °C en la superficie, lo cual no alteró significativamente la estructura del dosel ni la cobertura del suelo (Ruíz Rojas, 2019).

Previo a la quema prescrita se estableció un transecto orientado aleatoriamente de sureste a noroeste con una longitud de 200 m dentro del rodal, y cada 25 m se estableció un punto de muestreo. Se recolectaron muestras de suelo superficial (0–5 cm) y mantillo antes de la quema, un día y un año después de la misma. En cada momento, se obtuvieron 8 réplicas, dando un total de 24 muestras de mantillo y 24 muestras de suelo.

Análisis fisicoquímicos. Para medir el pH del mantillo, se mezclaron 2 g de muestra con 20 mL de agua Milli-Q (1:10 p/v). La mezcla se agitó por 30 min a 140 rpm y se midió el pH en el sobrenadante. Para el suelo, se usó una proporción 1:2 (suelo:agua). Las mezclas se decantaron y el pH se midió con un pH-metro calibrado Orion Versa Star Pro, marca Thermo Scientific.

Análisis elementales e isótopos estables $\delta^{15}N$ y $\delta^{13}C$. Las muestras secas y homogenizadas se analizaron en el Laboratorio de Isótopos Ambientales de la Universidad de Arizona. Se cuantificó el carbono (%C), nitrógeno (%N), y la composición isotópica ($\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$) por espectrometría de masas con flujo continuo (Deltaplus XP, Thermo Electron), acoplado a un analizador elemental Flash EA 1112. La precisión fue ±0.2‰. Los valores isotópicos se expresaron en notación delta (δ), relativos a los estándares internacionales: nitrógeno atmosférico (para $\delta^{15}N$) y PDB (Pee Dee Belemnite) para $\delta^{13}C$. En la práctica, se utilizaron materiales de referencia del laboratorio, previamente calibrados frente a estos estándares internacionales reconocidos. Los valores se calcularon con la fórmula:

$$\delta X = [(R_{muestra} / R_{estándar}) - 1] \times 1000,$$

donde X es ^{15}N o ^{13}C, y R es la razón $^{15}N/^{14}N$ o $^{13}C/^{12}C$.

Análisis estadísticos. Se utilizó una ANOVA de medidas repetidas para evaluar cambios a lo largo del tiempo. Cuando hubo diferencias significativas, se usaron pruebas *post-hoc* de Tukey. Para comparar mantillo y suelo a lo largo de la cronosecuencia, se realizaron pruebas t de Student bilaterales. Las variables analizadas fueron pH, %N, %C, C:N, $\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$. La normalidad se verificó con Shapiro–Wilk. Los resultados se reportaron como media ± error estándar, los análisis se realizaron en GraphPad Prism v10.5.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un[MM1] día después de la quema, el pH del mantillo aumentó significativamente de 4.86 ± 0.09 a 8.39 ± 0.43 ($p < 0.0001$), la $\delta^{15}N$ aumentó de –3.67 ± 0.82 ‰ a –0.33 ± 0.86 ‰, y la relación C:N disminuyó de 44.31 ± 2.69 a 20.66 ± 2.56. Un año después de la quema, la $\delta^{15}N$ del mantillo disminuyó hasta alcanzar valores cercanos a los previos a la quema (–1.46 ‰), mientras que la relación C:N aumentó a 84, casi el doble del valor previo a la quema.

En el suelo, el pH no mostró diferencias significativas antes de la quema (6.32) y un día después de la quema (6.70). La $\delta^{15}N$ del suelo aumentó de –0.23 ‰ a 1.62 ‰ un día después de la quema y permaneció enriquecida un año después de la quema (2.03 ‰). La relación C:N en el suelo no cambió de forma significativa, variando ligeramente de 18.3 antes de la quema a 12.80 un día después y 15.44 un año después de la quema. Los

valores de $\delta^{13}C$ no mostraron diferencias significativas a lo largo de la cronosecuencia de la quema (Cuadro 1, Figura 1).

Cuadro 1. Características fisicoquímicas del mantillo y el suelo antes, un día después y un año después de una quema prescrita en un sitio de manejo silvícola. Los valores son los promedios ± error estándar, n = 8.

Tiempo en la cronosecuencia	**pH**	**%C**	**%N**	**C:N**	**d ^{13}C (‰)**	**d^{15}N (‰)**
Mantillo						
Pre-quema	4.86 ± 0.09 ^{A}	39.14 ± 1.43 ^{A}	0.90 ± 0.04 ^{AB}	44.31 ± 2.69 ^{A}	-27.68 ± 0.07	-3.67 ± 0.82^{A}
1 día post-quema	8.39 ± 0.43 ^{B}	24.75 ± 4.27 ^{B}	1.16 ± 0.08^{A}	20.66 ± 2.56 ^{B}	-27.81 ± 0.14	-0.33 ± 0.86^{B}
1 año post-quema	4.85 ± 0.24 ^{A}	46.28 ± 0.44 ^{A}	0.63 ± 0.09 ^{B}	84.30 ± 10.52^{C}	-28.16 ± 0.20	-1.46 ± 0.99^{AB}
Suelo						
Pre-quema	6.32 ± 0.15^{AB}	12.60 ± 2.11	0.67 ± 0.07	18.24 ± 2.47 ^{A}	-27.01 ± 0.09	-0.23 ± 0.68 ^{A}
1 día post-quema	6.70 ±0.15^{A}	21.45 ± 7.34	1.91 ± 0.77	12.80 ± 0.71 ^{B}	-26.63 ± 0.11	1.62 ± 0.34 ^{B}
1 año post-quema	5.94 ± 0.20^{B}	20.61 ± 6.86	1.39 ± 0.46	15.44 ± 0.44 ^{AB}	-26.69 ± 0.27	2.03 ± 0.28 ^{B}

Distintas letras a lo largo de las columnas indican diferencias significativas (p < 0.05).

En el mantillo, la $\delta^{15}N$ experimentó un incremento significativo un día después de la quema. Este aumento fue compatible con la volatilización preferencial de compuestos nitrogenados más ligeros (^{14}N) (Huber *et al*., 2013). Un año posterior a la quema, la disminución de $\delta^{15}N$ sugiere deposición de material vegetal reciente. En contraste, la $\delta^{15}N$ del suelo mostró un aumento progresivo a lo largo de la cronosecuencia, lo que sugiere que no se incorporó de forma inmediata material fresco proveniente del mantillo. Este patrón fue consistente con la integración lenta de materia orgánica al suelo y con la acumulación de nitrógeno derivado de fuentes enriquecidas en ^{15}N, como cenizas o restos pirolizados (Huber *et al*., 2013).

El incremento marcado en la relación C:N del mantillo un año después de la quema, que alcanzó casi el doble del valor pre-quema, indica una acumulación de materia orgánica rica en carbono y pobre en nitrógeno. Este cambio puede atribuirse a la formación de compuestos recalcitrantes, como fragmentos parcialmente carbonizados, derivados del material vegetal afectado por el fuego. En el suelo, la relación C:N también disminuyó un día postquema, aunque en menor medida que en el mantillo, lo que sugiere un aumento relativo en la disponibilidad de nitrógeno. Un año después, esta relación mostró una recuperación parcial (Fontúrbel *et al*., 2021).

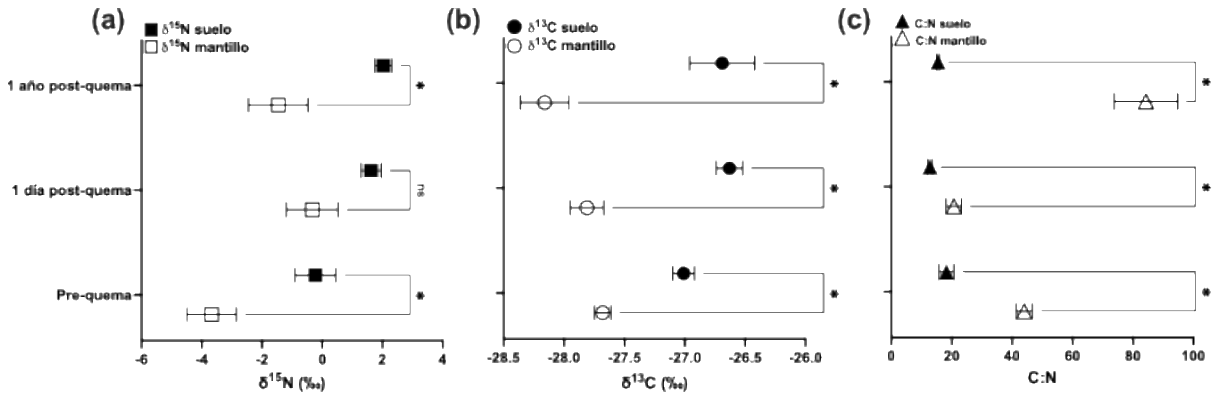


Figura 1. Promedio ± error estándar de d^{15}N, δ^{13}C, y C:N en mantillo y suelo antes, un día después, y un año después de una quema prescrita. Los símbolos intercalados muestran comparaciones pareadas entre tipos de muestra en la cronosecuencia. Los asteriscos indican diferencias significativas con un valor de $p < 0.05$.

CONCLUSIONES

El fuego prescrito indujo alteraciones inmediatas en el mantillo, reflejadas en cambios en el pH, la concentración de carbono y nitrógeno, la relación C:N y enriquecimiento en δ^{15}N. El suelo exhibió una respuesta más gradual, particularmente en la δ^{15}N. Las quemas prescritas de baja intensidad tienen la capacidad de modificar de forma controlada la dinámica biogeoquímica sin comprometer la integridad biogeoquímica del suelo. Por otra parte, se destaca el valor del monitoreo a largo plazo y del uso de los isótopos estables para comprender los efectos del fuego en ecosistemas forestales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del Ejido Ahuacapán, y de las siguientes personas: Laura Beramendi, Francisco Otero, Edith Cienfuegos, Ofelia Beltrán, Julieta Rosell, Elizabeth Solleiro y Daniel Piñero.

BIBLIOGRAFÍA

Alfaro-Sánchez, R., Camarero, J.J., Sánchez-Salguero, R., Sanguesa-Barreda, G. & De Las Heras, J. (2016). Post-fire Aleppo pine growth, C and isotope composition depend on site dryness. *Trees*, 30:581–595. https://doi.org/10.1007/s00468-015-1342-9.

Fontúrbel, T., Carrera, N., Vega, J.A. & Fernández, C. (2021). The effect of repeated prescribed burning on soil properties: A review. *Forests*, 12:767. https://doi.org/10.3390/f12060767.

Huber, E., Bell, T.L. & Adams, M.A. (2013). Combustion influences on natural abundance nitrogen isotope ratio in soil and plants following a wildfire in a sub-alpine ecosystem. *Oecologia*, 173:1063–1074. https://doi.org/10.1007/s00442-013-2665-0.

Su, Y., Ma, X., Gong, Y., Ahmed, Z., Han, W., Li, K. & Liu, X. (2022). Global patterns and drivers of litter decomposition under nitrogen enrichment: A meta-analysis. *Frontiers in Forests and Global Change*. https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.895774.

Wang, H., Finney, M.A., Song, Z., Wang, Z. & Li, X. (2021). Ecological techniques for wildfire mitigation: Two distinct fuelbreak approaches and their fusion. *Forest Ecology and Management*, 495:119376. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119376.

DIVERSIDAD Y FUNCIONALIDAD DE CIANOBACTERIAS ASOCIADAS A COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO EN MÉXICO

Janeth Jacqueline Araujo Encinas[1]; Zulia Mayari Sánchez Mejía[1].

[1] Instituto Tecnológico de Sonora, 5 de febrero 818 sur colonia Centro 85000, Ciudad Obregón, Sonora, México.

Correo del autor de correspondencia: zulia.sanchez26494@potros.itson.edu.mx

RESUMEN

En los primeros milímetros de suelo, en regiones limitadas por la disponibilidad de agua, se desarrollan comunidades microbianas denominadas costras biológicas del suelo (CBS). Las CBS cumplen con funciones ecosistémicas clave como la estabilización del suelo, la fijación de nitrógeno, el intercambio de gases y la retención de agua, y por lo tanto proporcionan servicios ecosistémicos, cuyo valor no ha sido estudiado a detalle. En este trabajo se integra la información disponible sobre las cianobacterias del grupo morfológico destacado en las CBS en México, con un enfoque en 1) taxonomía, 2) funciones ecológicas, 3) servicios ecosistémicos. Se realizó una revisión sistemática de literatura científica desde 1990, recopilando datos sobre regiones de estudio, especies identificadas y características ambientales. Se documentaron 28 géneros y 69 especies, los géneros más frecuentes fueron *Microcoleus* sp., *Nostoc* sp. y *Scytonema* sp. Entre las funciones reportadas destacan colonizar suelos expuestos, formar una matriz de suelo estable y fijar nitrógeno. En base a estas funciones, los servicios ecosistémicos a los que contribuyen son soporte y regulación. Este trabajo destaca la importancia ecológica de las cianobacterias de la CBS como reguladores clave de los procesos funcionales del suelo en ecosistemas secos de México, y la apremiante necesidad de estudiarlas en regiones poco exploradas.

PALABRAS CLAVE: *Funciones ecológicas, biodiversidad, servicios ecosistémicos*

INTRODUCCIÓN

Las Costras Biológicas del Suelo (CBS) son consorcios microbianos conformadas por cianobacterias, líquenes, briofitas, hongos y algas verdes, y se encuentran en los primeros 5-50 mm del suelo en zonas áridas y semiáridas a escala global (Belnap *et al.,* 2001; Büdel y Colesie, 2014), cubriendo alrededor del 12-40% de los suelos desnudos (Colesie *et al.,* 2016). En regiones limitadas de humedad, la cobertura vegetal es dispersa y la radiación solar incide directamente sobre el suelo (Belnap, 2007), favoreciendo el desarrollo de las CBS. Estas presentan distintas funciones ecológicas, contribuyen a la estabilidad del suelo, regulan la infiltración de agua y participan en los ciclos biogeoquímicos (Castillo y Maestre, 2011) brindando servicios ecosistémicos de regulación y soporte.

Las cianobacterias son consideradas el organismo fotosintético colonizador dominante de la CBS (Maya *et al.,* 2002), creando condiciones edáficas adecuadas para el posterior establecimiento de otros organismos del consorcio (Rivera-Aguilar *et al.,* 2006). En México

han sido estudiadas durante las últimas dos décadas (Sosa-Quintero *et al.,* 2022), obteniendo una línea base de conocimientos; sin embargo, se necesitan inventarios más completos en cuanto a taxonomía y distribución, así como información acerca de su participación en la dinámica de ecosistemas y cómo variables climáticas afectan directamente a su composición.

El objetivo de este trabajo es analizar la literatura existente acerca de las cianobacterias formadoras de la CBS en México, con énfasis en su composición taxonómica dominante, funciones ecológicas detectadas y servicios ecosistémicos, que evidencian su papel en ecosistemas áridos y semiáridos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo una revisión de literatura de forma sistemática, recabando información de investigaciones realizadas en México acerca de la CBS desde 1990 hasta la actualidad, dicha recopilación consideró investigaciones disponibles en bases de datos científicas y plataformas de búsqueda, empleando como palabras clave tanto en español como en inglés: cianobacterias, costras biológicas, cyanobacteria, funciones ecológicas, ecosystem services, México, nitrógeno, biological soil crusts, Sonoran desert, BSC, biocostras.

La información se organizó en una base de datos identificando los siguientes puntos: Primer autor, región de estudio, especie o género identificado, características de sitio de estudio (temperatura media anual y precipitación media anual), coordenadas del sitio, altitud reportada, vegetación asociada, ecosistema, tipo de suelo, función ecológica detectada de la cianobacteria y/o del género, y servicio ecosistémico que brinda.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se encontraron un total de 41 investigaciones que han sido realizadas en los desiertos y semidesiertos de México abarcando los años de 1998 a 2025, recabando artículos, literatura gris y capítulos de libros, en los que se ha estudiado la composición de la CBS, su participación en los ciclos biogeoquímicos de C, N y agua, y su funcionamiento en los ecosistemas en los que se encuentran.

En México se han reportado 28 géneros y 69 especies de cianobacterias asociadas a la CBS estudiadas en los desiertos, semidesiertos y un área subtropical (Maya *et al.,* 2002) del país. Los géneros comúnmente registrados han sido *Microcoleus* sp., *Nostoc* sp., y *Scytonema* sp., con especies como *Microcoleus* sp., *Nostoc commune*, *Nostoc* sp., *Scytonema javanicum* y *Scytonema* sp., las cuales también son dominantes en las CBS que se encuentran en Norteamérica (Belnap, 2007; Rosentreter y Belnap, 2001). Estas cianobacterias destacan por ser organismos filamentosos pioneros, capaces de establecerse en condiciones extremas de radiación al contar con pigmentos fotosintéticos protectores-UV como la escitonemina (Péli *et al.,* 2011). *Nostoc* sp. y *Scytonema* sp. poseen heterocistos, que les permiten fijar nitrógeno, mientras que *Microcoleus* sp., aunque no forma heterocistos, contribuye significativamente a la formación de CBS al adherirse a las partículas del suelo mediante la producción de exopolisacáridos (EPS), favoreciendo así los tres géneros a la estabilidad y fertilidad del suelo (Guida *et al.,* 2023; Maya *et al.,* 2002;

Veste *et al.,* 2011), creando condiciones adecuadas para el posterior establecimiento de otros organismos formadores de la CBS.

Se ha detectado que las principales funciones ecológicas que desempeñan las cianobacterias en las CBS (Figura 1) incluyen la protección y estabilización del suelo, la fijación de nitrógeno atmosférico y la modulación de la retención hídrica en los suelos en los que se encuentran. Cianobacterias filamentosas como *Microcoleus* sp., *Scytonema* sp. y *Nostoc* sp. se adhieren a los sólidos del suelo mediante sus filamentos, formando una matriz estable (Veste *et al.,* 2011), lo que contribuye a la resistencia frente a la erosión y a la estabilidad de la superficie edáfica.

Asimismo, las cianobacterias heterocísticas son eficientes fijadoras de nitrógeno atmosférico bajo condiciones anaeróbicas, contribuyendo alrededor del 30% del nitrógeno total fijado en el suelo (Guida *et al.,* 2023; Maya *et al.,* 2002), mejorando las condiciones de fertilidad del suelo. Sin embargo, dicha tasa de fijación puede variar según las condiciones climáticas y las especies presentes en la CBS (Belnap, 2001). Las cianobacterias influyen en la modulación y retención de agua debido a que aumentan el tiempo en el que agua está en contacto con el suelo, incrementando su infiltración al absorber altas cantidades de agua (Barrera-Zubiaga y Godínez-Álvarez, 2018), debido a que modifican la porosidad del suelo y la agregación de partículas (Guida *et al.,* 2023).

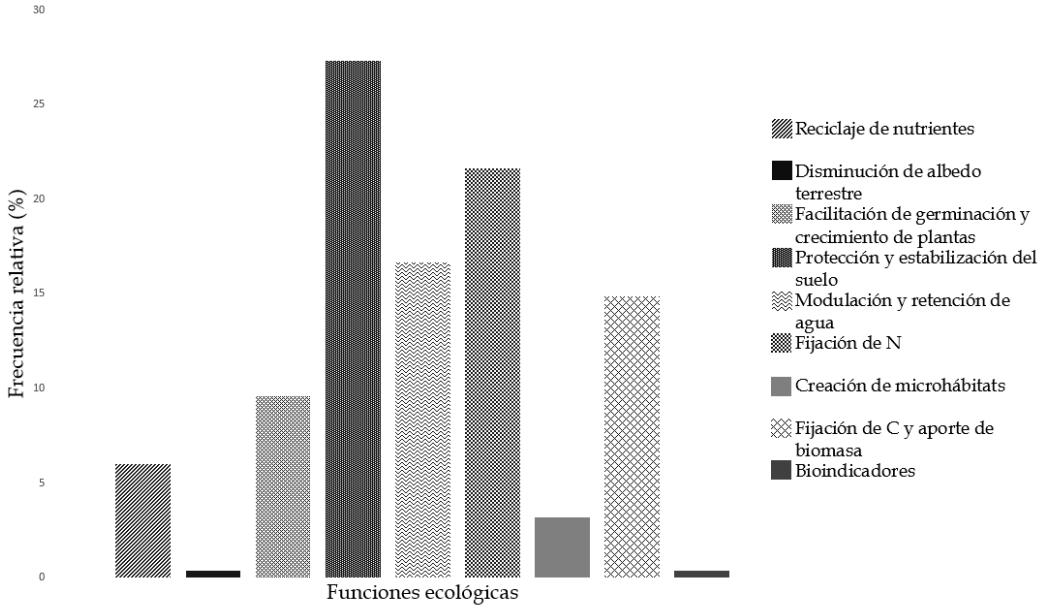


Figura 1. Frecuencia relativa de las funciones ecológicas que ha sido registradas para las cianobacterias de las CBS en México (41 trabajos analizados).

Las funciones ecológicas que proveen las cianobacterias presentes en las CBS se agrupan en servicios ecosistémicos (Figura 2) de soporte y regulación, y en una mínima proporción en servicios de provisión. El único servicio de provisión reportado se relaciona a la especie *Scytonema* cf. *Ocellatum*, obtenida de la CBS como una alternativa de fertilizante para cultivo de chile (López-Cortés & Maya-Delgado, 2003).

Dichos servicios ecosistémicos proporcionados por los microorganismos desempeñan funciones clave a largo plazo, esenciales para la conservación de suelo en ecosistemas áridos y semiáridos (Veste *et al.*, 2011).

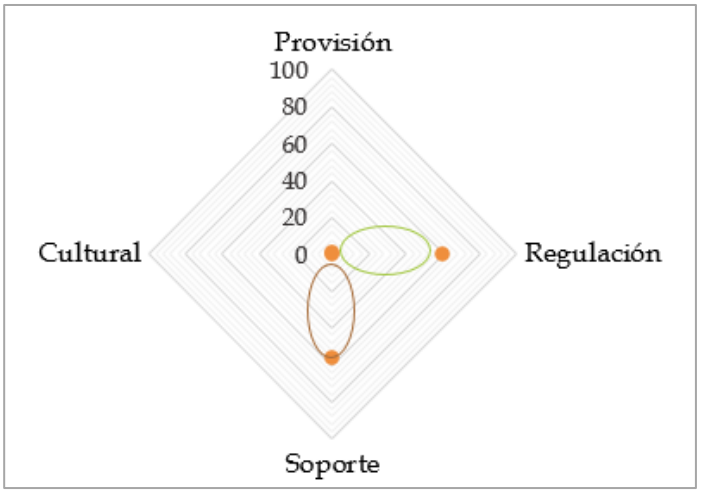


Figura 2. Servicios ecosistémicos que presentan las cianobacterias presentes en la CBS en México (41 trabajos analizados).

CONCLUSIONES

Las cianobacterias presentes en las costras biológicas del suelo (CBS) en México muestran una composición diversa, con una dominancia de géneros filamentosos que actúan como organismos pioneros al colonizar el suelo. Esta prevalencia se relaciona con la presencia de pigmentos que les permiten adaptarse a condiciones climáticas extremas, favoreciendo su establecimiento en regiones áridas. Asimismo, se identificó que las cianobacterias desempeñan funciones ecológicas clave, como la estabilización del suelo y la regulación de procesos funcionales en ecosistemas con limitaciones hídricas.

Los servicios ecosistémicos que proporcionan las CBS se vinculan principalmente con funciones de soporte y regulación, resaltando su papel en la resiliencia de ecosistemas áridos y semiáridos. Al intervenir en la fertilidad del suelo, la retención hídrica y el balance de nutrientes, las cianobacterias de las CBS contribuyen a procesos que pueden traducirse en beneficios ecosistémicos relevantes en regiones con limitaciones ambientales. No obstante, son pocos los estudios que han abordado de manera directa esta relación, lo que abre un campo de oportunidad para profundizar en la conexión entre las funciones ecológicas reportadas y los servicios ecosistémicos que derivan de ellas. Ampliar este conocimiento no solo permitiría dimensionar mejor su valor ecológico en México, sino también fortalecer los esfuerzos orientados a su conservación.

La información obtenida subraya la relevancia ecológica de las cianobacterias y del establecimiento de la CBS en ecosistemas áridos y semiáridos, así como su potencial para integrarse en estrategias de conservación y restauración de suelos. Finalmente, es relevante conocer la diversidad y función de las CBS en el contexto de cambio climático donde se proyecta que las regiones limitadas de humedad se expandirán y y los suelos enfrentarán mayores presiones ambientales. En este escenario, comprender su papel en la regulación de procesos clave permitirá no solo anticipar los efectos del cambio climático, sino también aprovechar su potencial como aliadas en la resiliencia y sostenibilidad de los ecosistemas áridos.

AGRADECIMIENTOS

El financiamiento para que este proyecto fuera posible incluyen CONAHCyT Ciencia Básica 286494, PROFAPI-2025, y beca de posgrado a Janeth Araujo no. 2043221.

BIBLIOGRAFÍA

Barrera-Zubiaga, E. & Godínez-Álvarez, H. (2018). Infiltración en biocostras en una región semiárida del centro de México. *Terra Latinoamericana*, *36*(4), 337–343. https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.335.

Belnap, J. (2001). Factors Influencing Nitrogen Fixation and Nitrogen Release in Biological Soil Crusts. In *Ecological Studies* (Vol. 150, pp. 241–261). https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8_19.

Belnap, J. (2007). From the Ground Up: Biological Soil Crusts in the Sonoran Desert. In R. S. Felger & B. Broyles (Eds.), *Dry Borders: Great Natural Reserves of the Sonoran Desert* (pp. 343–348). University of Utah Press.

Belnap, J., Büdel, B. & Lange, O. L. (2001). Biological Soil Crusts: Characteristics and Distribution. *Ecological Studies*, *150*, 3–30.

Büdel, B. & Colesie, C. (2014). Biological soil crusts. In D. A. Cowan (Ed.), *Antarctic Terrestrial Microbiology: Physical and Biological Properties of Antarctic Soils* (Vol. 9783642452130, pp. 131–161). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-45213-0_8.

Castillo-Monroy, A.P. & Maestre, F. T. (2011). La costra biológica: Avances recientes en el conocimiento de su estructura y función ecológica. *Revista Chilena de Historia Natural*, *84*, 1–21.

Colesie, C., Felde, V. J. M. N. L. & Büdel, B. (2016). Composition and Macrostructure of Biological Soil Crusts. *Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands*, *226*(Ecological Studies), 159–172. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30214-0_9.

Guida, G., Nicosia, A., Settanni, L. & Ferro, V. (2023). A review on effects of biological soil crusts on hydrological processes. *Earth-Science Reviews*, *243*, 104516. https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2023.104516.

López-Cortés, A. & Maya-Delgado, Y. (2003). Cryptobiotic cyanobacteria: an alternative in organic agriculture. *Algological Studies/Archiv Für Hydrobiologie, Supplement Volumes*, *109*, 387–394. https://doi.org/10.1127/1864-1318/2003/0109-0387.

Maya, Y., López-Cortés, A. & Soeldner, A. (2002). Cyanobacterial microbiotic crusts in eroded soils of a tropical dry forest in the Baja California Peninsula, Mexico. *Geomicrobiology Journal*, *19*(5), 505–518. https://doi.org/10.1080/01490450290098469.

Péli, E., Lei, N., Pócs, T., Laufer, Z., Porembski, S. & Tuba, Z. (2011). Ecophysiological responses of desiccation- tolerant cryptobiotic crusts. *Cent Eur J Bio*, *6*, 838–849. https://doi.org/10.2478/s11535-011-0075-z.

Rivera-Aguilar, V., Montejano, G., Rodríguez-Zaragoza, S. & Durán-Díaz, A. (2006). Distribution and composition of cyanobacteria, mosses and lichens of the biological soil crusts of the Tehuacán Valley, Puebla, México. *Journal of Arid Environments*, *67*(2), 208–225. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.013.

Rosentreter, R. & Belnap, J. (2001). Biological Soil Crusts of North America. In J. Belnap y O. L. Lange (Eds.), *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. Ecological Studies.* (Vol. 150, pp. 31–50). Springer Berlin. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-642-56475-8_2.

Sosa-Quintero, J., Godínez-Alvarez, H., Camargo-Ricalde, S. L., Gutiérrez-Gutiérrez, M., Huber-Sannwald, E., Jiménez-Aguilar, A., Maya-Delgado, Y., Mendoza-Aguilar, D., Montaño, N. M., Pando-Moreno, M. & Rivera-Aguilar, V. (2022). Biocrusts in Mexican deserts and semideserts: A review of their species composition, ecology, and ecosystem function. In *Journal of Arid Environments* (Vol. 199). Academic Press. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104712.

Veste, M., Breckle, S.-W., Eggert, K. & Littmann, T. (2011). Vegetation pattern in arid sand dunes controlled by biological soil crusts along a climatic gradient in the Northern Negev desert. Basic and Applied Dryland Research, 5(1), 1–16. https://doi.org/10.1127/badr/5/2011/1.

ESTABILIDAD TÉRMICA DE LA MOS BAJO UN GRADIENTE DE ARIDEZ EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO

Sayuri Liset López Lozano[1]; Juan Antonio Reyna Pérez[2]; Bruno Manuel Chávez Vergara[3]

[1] Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México, Batalla 5 de Mayo s/n esquina Fuerte de Loreto, Colonia Ejército de Oriente, Iztapalapa C.P. 09230, Ciudad de México, México.

[2] Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Coyoacán C.P. 04510, Ciudad de México, México.

[3] Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

Correo del autor de correspondencia: chavezvb@geologia.unam.mx

RESUMEN

Los bosques templados mexicanos (BTM) ocupan 20% del territorio nacional y presentan amplios gradientes ambientales que influyen en la dinámica de la materia orgánica del suelo (MOS). La calorimetría diferencial de barrido (DSC) permite evaluar la estabilidad térmica de la MOS al identificar fracciones lábiles y estables. Se analizó la estabilidad de la MOS en cuatro sitios de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, dominados por Quercus castanea, a lo largo de un gradiente de aridez. Los suelos más húmedos fueron ricos en limos y halloysitas, mientras que los más secos presentaron mayor contenido de arcillas tipo caolinita. La concentración de carbono orgánico disminuyó con la profundidad, sin relación clara con la humedad. En todos los sitios, más del 75% de la MOS fue lábil. Se concluye que la textura, en particular la abundancia de arcillas determina la estabilidad de la MOS más que el gradiente climático.

PALABRAS CLAVE: *Calorimetría diferencial de barrido; índice de aridez de Martonne; humedad; materia orgánica del suelo; suelo.*

INTRODUCCIÓN

Los bosques templados mexicanos (BTM) cubren aproximadamente 20 % de la superficie del territorio nacional, y son la clase de bosques más ampliamente distribuidos (Mora, 2022; Kolb *et al*., 2022; Galicia *et al*., 2018). Los BTM están expuestos a una gran variedad de condiciones ambientales como altitud (desde 1,500 hasta los 3,700 msnm), temperatura media anual (de 5 a 26 °C) y precipitación anual media (desde 500 hasta 1,800 mm) (Ávila-Akerberg *et al.,* 2023; Kolb *et al*., 2022; Mora, 2020; Santini *et al*., 2019). Las especies del género *Quercus* constituyen uno de los elementos dominantes de la vegetación de los BTM (Rzedowski, 2005; Valencia, 2004). Los gradientes ambientales a los cuales están sujetos los BTM tienen influencia en su productividad y probablemente también sobre la cantidad y el tiempo de residencia (TR) de la materia orgánica de suelo (MOS), lo cual está fuertemente relacionado con la estabilidad de la MOS frente a los procesos de descomposición (Galicia *et al*., 2016; Lützow *et al*., 2008; Lützow *et al*., 2006).

Una herramienta muy útil para inferir la estabilidad de la MOS es la calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés). La cual se basa en la descomposición exotérmica de sustancias orgánicas, y brinda información sobre la distribución de las fracciones lábiles o estables de la MOS de manera rápida y económica, es un método de fácil empleo lo cual permite el manejo de un gran número de muestras y tiene un bajo consumo de reactivos químicos (Salgado *et al*., 2010; Merino *et al*., 2018; Barros *et al*., 2007). Los resultados obtenidos del DSC se representan en gráficos, termogramas, que indican la cantidad de energía liberada de la combustión de una muestra en función de la temperatura o el tiempo y presentan picos exotérmicos o endotérmicos. Las regiones o picos exotérmicos representan áreas de liberación de energía, indican la combustión de materia orgánica, mientras que las regiones o picos endotérmicos representan áreas que absorben energía, las cuales son indicativas de la deshidroxilación de componentes minerales (Stone y Plante, 2015). Este trabajo buscó analizar la estabilidad térmica de la MOS a lo largo de un gradiente de aridez con presencia de *Quercus castanea* como cobertura vegetal con el objetivo principal de caracterizar el grado de estabilidad térmica de la MOS mediante la DSC y determinar cuáles son los factores que influyen en este proceso.

MATERIALES Y MÉTODOS

La Cuenca del Lago de Cuitzeo (CLC), en el occidente de México, corresponde en 94 % al estado de Michoacán y el resto a Guanajuato. Ubicada en la Faja Volcánica Transmexicana, es una cuenca endorreica formada por procesos tectónicos y volcánicos. Su principal aportador es el Río Grande de Morelia, que desemboca en el lago de Cuitzeo (CONAGUA, 2009; INEGI, 2020, 2022). El punto más alto es el cerro La Nieve (3,428 msnm) y el más bajo el lago (1,774 msnm), con temperatura media anual de 17.3 °C y precipitación de 778 mm, concentrada entre julio y septiembre. El 81% del territorio presenta clima templado subhúmedo (Cw). En el suroeste predominan bosques caducifolios de encino dominados por *Q. castanea* (Reyna, 2021; Pérez, 2014).

Se estudiaron cuatro sitios (El Águila, Atécuaro, Umécuaro y Jesús del Monte), distribuidos a lo largo de un gradiente de aridez según el Índice de Martonne, con diferencia de 15.5 puntos (Ag > At > JdM > Um). Se recolectaron muestras de los dos primeros horizontes (horizontes superficial y subsuperficial), que corresponden a los primeros 25 cm de suelo para análisis de textura, relación arcilla:COS, difracción de rayos X, calorimetría diferencial de barrido (DSC) y concentración de carbono orgánico del suelo (COS). Los análisis se realizaron en laboratorios del Instituto de Geología, UNAM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De manera general, la granulometría de los suelos en los sitios más húmedos (el Águila y Atécuaro) fueron dominados por limos, mientras que los suelos de los sitios menos húmedos (Umécuaro y Jesús del Monte) estuvieron dominados por arcillas, esto refleja que la granulometría está influida por humedad ambiental, lo cual ha sido ampliamente reportado para suelos de origen volcánico (Sedov *et al.,* 2003). La DRX reveló la presencia de dos tipos de arcillas: halloysitas en los sitios con mayor humedad ambiente y arcillas

de tipo caolinita en los sitios con menor humedad ambiente. En estudios previos se ha reportado que, en ambientes húmedos, con sequía estacional baja, favorece la formación y conservación de la halloysita, la abundancia de agua y lixiviación les permite mantener su estructura hidratada (Lyu *et al.*, 2022), mientras que en ambientes con marcada estacionalidad y menor lixiviación promueven la deshidratación de la halloysita y su transformación en caolinita (Rasmussen *et al.*, 2010). La concentración promedio de COS en los primeros 25 cm de profundidad aproximadamente, no se observó que ésta este influenciada por la humedad ambiente debido a que no fue posible observar alguna tendencia conforme disminuye la humedad ambiente en los sitios, sin embargo, cuando se compara la concentración de COS según la profundidad de la muestra, se observa una tendencia a disminuir conforme aumenta su profundidad.

En los primeros 25 cm de profundidad, la concentración promedio de COS no mostró influencia de la humedad ambiente, ya que no se observó tendencia alguna asociada a la disminución de esta en los sitios; sin embargo, cuando se compara la concentración de COS según su profundidad, se observa una tendencia a disminuir conforme aumenta su profundidad.

En los primeros 25 cm de profundidad, la concentración promedio de COS no mostró influencia de la humedad ambiente, ya que no se observó tendencia alguna asociada a la disminución de esta en los sitios, como se ha reportado previamente en que la humedad ambiente influye positivamente en la concentración de COS, es decir, a mayor humedad mayor concentración de COS (Valenzuela y Visconti, 2018; Galluzi *et al* 2024). Además, se observó que la concentración de COS tiende a disminuir conforme aumenta la profundidad de la muestra como ha sido reportado (Valenzuela y Visconti, 2018; Stone y Plante, 2015; Stone *et al.*, 2014).

Cuadro 1. Porcentaje de arcillas y limos, concentración de COS, caracterización térmica del suelo mediante DSC.

		El Águila		**Atécuaro**		**Umécuaro**		**Jesús del Monte**	
		Ag1	Ag2	At1	At2	Um1	Um2	JdM1	JdM2
Profundidad (cm)		0-7	7-29	0-3	3-20	0-10	10-23	0-10	10-20
IM		46.5		39.1		37.8		31.5	
Textura (%)	Arcilla	38.5	36.9	40.4	45.2	70.9	80.1	52.8	37.6
	Limos	52.3	52.3	53.3	50.7	24.3	15.4	30.1	47.4
Concentración COS (mg g^{-1})		84.3	40.8	72.4	37.8	59.2	17.0	42.9	39.6
		62.6		55.1		38.1		41.2	
Calorimetría Diferencial de Barrido	Q′ (µV mg^{-1})	521	198	513	259	195	100	269	296
	Q_1 %	77.9	81.9	81.0	90.2	98.2	93.4	90.5	85.0
	Q_2 %	15.3	16.8	15.4	8.21	1.75	6.31	8.30	11.5
	Q_3 %	6.80	1.30	3.58	1.55	0.01	0.30	1.25	3.53

Los análisis de DSC indican que los compuestos térmicamente lábiles dominan en todos los sitios con más del 75% sin importar la profundidad de la muestra; los

compuestos térmicamente extra recalcitrantes mostraron dos comportamientos, en los sitios con mayor humedad tienden a disminuir en el horizonte subsuperficial en relación al horizonte superficial, mientras que en los sitios con menor humedad tienden a incrementar en el horizonte subsuperficial en relación al horizonte superficial a pesar de presentar regiones endotérmicas muy marcadas.

CONCLUSIONES

No se encontró evidencia clara de que la estabilidad de la materia orgánica del suelo esté influenciada únicamente por el gradiente climático, aunque se pudo observar que el sitio con mayor humedad ambiente fue el que tuvo mayores concentraciones de COS y MOS estable (Q_3%). Con lo cual se concluye que la textura, en específico la cantidad de arcillas, tiene un fuerte impacto en la estabilidad de la MOS ya que las altas concentraciones de arcilla afectan negativamente las concentraciones de carbono orgánico.

BIBLIOGRAFÍA

Ávila-Akerberg, V., Rosaliano-Evaristo, R., González-Martínez, T., Pichardo-García, B., & Serrano-González, D., (2023). Classification and nomenclature of temperate forest types in Mexico. *Vegetation Classification and Survey,* 4, 329–341.

Barros, N., Salgado, J. & Feijóo, S. (2007). Calorimetry and soil. *Thermochimica Acta,* 458, 11-17.

CONAGUA. (2009). Plan de Gestión Integral de los Recursos Naturales de la Cuenca del Lago de Cuitzeo. CONAGUA. Michoacán, México.

Galicia, L., Chávez-Vergara, B. M., Kolb, M., Jasso-Flores, R. I., Rodríguez-Bustos, L. A., Solís, L. E., Guerra de la Cruz, V., Pérez-Campuzano, E. & Villanueva, A. (2018). Perspectivas del enfoque socioecológico en la conservación, el aprovechamiento y pago de servicios ambientales de los bosques templados de México. Madera y Bosques, 24 (2), e2421443.

Galicia, L., Gamboa Cáceres, A. M., Cram, S., Chávez Vergara, B., Peña Ramírez, V., Saynes, V. & Siebe C. (2016). Almacén y dinámica del carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. Terra Latinoamericana, 34 (1).

INEGI, (2020). Cuenca hidrológica Lago de Cuitzeo. Humedales. Informe técnico. INEGI, México.

INEGI (2022). Estudio de información integrada de la cuenca Lago de Cuitzeo y otras. INEGI, México.

Kolb, M., Cruz-Cano, R., Reyes-Ronquillo, I., Chávez-Vergara, B., Jasso-Flores, I., Rodríguez-Bustos, L., Solís, E. & Galicia, L. (2022). Is there a forest-water-nexus for Mexican temperate forests? Ecohydrology & Hydrobiology, 22, 1–11.

Lai, Y.-Q., Wang, H.-L., & Sun, X.-L. (2021). A comparison of importance of modelling method and sample size for mapping soil organic matter in Guangdong, China. *Ecological Indicators,* 126, 107618.

Lützow, M. V., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B. & Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions- a review. *European Journal of Soil Science*, 57, 426–445.

Lützow, M. V., Kögel-Knabner, I., Ludwig, B., Matzner, E., Flessa, H., Ekschmitt, K., Guggenberger, G., Marschner, B., & Kalbitz, K., (2008). Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171, 111-124.

Lyu, H., Watanabe, T., Ota, Y., Hartono, A., Anda, M., Dahlgren, R. & Funakawa, S. (2022). Climatic controls on soil clay mineral distributions in humid volcanic regions of Sumatra and Java, Indonesia. *Geoderma*, 425, 116058

Mora, F. (2022). A suite of ecological indicators for evaluating the integrity of structural eco-complexity in Mexican forests. Ecological Complexity, 50, 101001.

Pérez López, S. P., (2014). Regeneración natural de Quercus Castanea Neé (Fagaceae) en bosques fragmentados de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán [Tesis de licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo]. Morelia, Michoacán.

Rasmussen, C., Dahlgren, R. & Southard, R. (2010). Basalt weathering and pedogenesis across an environmental gradient in the southern Cascade Range, California, USA. Geoderma, 154, 473–485.

Reyna Pérez, J.A. (2021). Composición química de las ceras cuticulares en hojas verdes de Quercus castanea a lo largo de un gradiente de precipitación en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Ciudad de México.

Rzedowski, J., (2005). Vegetación de México. México: CONABIO.

Santini, N., Adame, M., Noland, R., Miquelajauregui, Y., Piñero, D., Mastretta-Yanesa, A., Cuervo-Robayo, A. & Eamus, D., (2019). Storage of organic carbon in the soils of Mexican temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 446, 115–125.

Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E. & Gama-Castro, J. (2003). Andosol to Luvisol evolution in Central Mexico: Timing, mechanisms and environmental setting. *CATENA*, 54(3), 495-513.

Valencia, A.S. (2004). Diversidad del género Quercus (Fagaceae) en México. Boletín de la Sociedad Botánica de México, 75, 33-53.

Merino, A., Fonturbel, M.T., Fernández, C., Chávez-Vergara, B., García-Oliva, F. & Vega, J. A. (2018). Inferring changes in soil organic matter in post-wildfire soil burn severity levels in a temperate climate. *Science of the Total Environment, 627*, 622-632.

Salgado, J., Proupín, J., Villanueva, M., Rodríguez-Añón, J.A. & Barros, N. (2010). Effect of the soil uses on their thermal stability. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 99, 911-916.

Stone, M., & Plante, A. (2015). Relating the biological stability of soil organic matter to energy availability in deep tropical soil profiles. *Soil Biology & Biochemistry*, 89, 162-171.

LIBERACIÓN DE ARSÉNICO DURANTE LA DESCOMPOSICIÓN *IN SITU* DEL SARGAZO

Bruno Chávez Vergara[1,2]; Elizabeth Solleiro Rebolledo[1]; Rafael López Martínez[1]; Ofelia Beltrán Paz[1,2]; Águeda E. Ceniceros Gómez[3]; Germán Yañez Mendoza[4]

[1] Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
[2] Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, Ciudad de México, México.
[3] Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
[4] Subdirección de Ecología, Gobierno Municipal de Cozumel, Cozumel, Quintana Roo, México.

Correo del autor de correspondencia: chavezvb@geologia.unam.mx.

RESUMEN

El arribo masivo de sargazo en el Caribe mexicano ha generado preocupaciones ambientales debido a la liberación de nutrientes y elementos potencialmente tóxicos (PTE) durante su descomposición. Este estudio evaluó la liberación *in situ* de arsénico (As) y otros PTE a partir del sargazo varado en la costa de Cozumel. Se muestrearon diferentes estratos de descomposición y se analizaron parámetros fisicoquímicos y concentraciones de PTE en el material y en los lixiviados. Los resultados mostraron que el As fue el elemento más abundante en el material fresco (88.6 mg kg^{-1}) y disminuyó progresivamente hasta 10.5 mg kg^{-1} en etapas avanzadas de descomposición. La liberación de As en lixiviados alcanzó hasta el 84% en los estratos superficiales, disminuyendo en capas más profundas. Estos hallazgos evidencian un riesgo potencial de contaminación en ecosistemas costeros y en los acuíferos kársticos del Caribe mexicano. Se recomienda establecer programas de monitoreo y desarrollar estrategias de mitigación que reduzcan la movilidad y biodisponibilidad del As para disminuir los riesgos ambientales y de salud asociados.

PALABRAS CLAVE: *Caribe mexicano; descomposición; riesgo ambiental; Sargassum* spp.

INTRODUCCIÓN

En la última década, las costas del Caribe han enfrentado un fenómeno sin precedentes: el arribo masivo de sargazo (*Sargassum* spp.), que ha transformado tanto la dinámica ecológica como socioeconómica de la región (Johns *et al.*, 2020; Chávez *et al.*, 2020). Por ejemplo, en 2018, se estimó que aproximadamente 20 millones de toneladas de sargazo arribaron a las costas de la región, con impactos significativos en playas, arrecifes y comunidades costeras (Wang *et al.,* 2022). Este incremento está relacionado con el aumento en los flujos de nutrientes hacia las zonas oceánicas de desarrollo del sargazo, lo que ha permitido su crecimiento descontrolado. El sargazo fresco se caracteriza por presentar altas concentraciones de nitrógeno, carbohidratos hidrolizables y compuestos fenólicos, lo que facilita su rápida descomposición (Bauta *et al.*, 2024; Mayers *et al.*, 2013). Durante este proceso se liberan nutrientes y compuestos orgánicos de bajo peso molecular, pero también elementos potencialmente tóxicos (EPT), entre los que el arsénico (As) es de mayor atención (Olguin-Maciel *et al.*, 2022; Al Mamun *et al.*, 2019). La

acumulación de sargazo en las playas genera zonas de eutrofización, formación de mareas marrones y disminución de la biodiversidad en ecosistemas marinos (Akinnawo, 2023). Además, bajo condiciones naturales, la descomposición produce gases como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y amoníaco (NH_3), que representan riesgos adicionales tanto para el ambiente como para la salud humana (Resiere *et al*., 2023). Si bien estudios previos han demostrado la liberación de As en condiciones controladas (Olguin-Maciel *et al*., 2022), existe poca información sobre su dinámica en ambientes naturales. Este estudio tiene como objetivo evaluar las concentraciones y la liberación *in situ* de EPT durante la descomposición del sargazo en la costa de Cozumel, con énfasis en el As, para comprender mejor los riesgos ambientales asociados y contribuir al diseño de estrategias de mitigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en agosto de 2018 en una playa rocosa al sureste de Cozumel (20°18′20.40′′ N; 86°56′41.28′′ W), donde el sargazo había arribado desde junio de ese año. El oleaje acumuló la biomasa formando pilas de aproximadamente 60 cm de altura. Se realizó un corte vertical para identificar cinco estratos de descomposición: DL1 (0–16 cm), DL2 (16–27 cm), DL3 (27–39 cm), DL4 (39–46 cm) y DL5 (46–52 cm), además de muestras de biomasa recién llegada (RA) sin señales visibles de descomposición. Las muestras se almacenaron a 4 °C en oscuridad y se procesaron en un máximo de dos semanas. En laboratorio se determinaron: pH y conductividad eléctrica, humedad mediante secado a 70 °C hasta peso constante. La concentración total de EPT (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) mediante digestión ácida con HNO_3 y H_2O_2, y análisis en espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) bajo estándares QA/QC de la EPA (US EPA, 2007; US EPA, 2018). Para los lixiviados, se mezclaron 50 g de muestra fresca con 500 mL de agua desionizada, se agitaron por 24 h y se filtraron. Posteriormente se digirieron alícuotas de 20 mL y se analizaron por ICP-OES. Los datos se expresaron en mg kg^{-1} de materia seca para facilitar su interpretación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentraciones de EPT. El arsénico (As) presentó la concentración más elevada entre todos los EPT en todas las etapas. En biomasa fresca se registraron 88.6 mg kg^{-1}, disminuyendo gradualmente hasta 10.5 mg kg^{-1} en el estrato más profundo (DL5). Este patrón indica una liberación activa de As en los primeros días de descomposición. Otros metales como Cd, Cr y Zn mostraron incrementos relativos en las capas más descompuestas, mientras que el Ni se mantuvo relativamente constante (~3 mg kg^{-1}). En los lixiviados, solo As y Cu se detectaron en concentraciones significativas. El As lixiviado representó hasta el 84% del total presente en biomasa recién llegada y disminuyó a menos del 20% en las capas más profundas. Este hallazgo evidencia que la liberación de As ocurre principalmente en las etapas iniciales del proceso (Olguin-Maciel *et al*., 2022).

Implicaciones ambientales. Estos resultados coinciden con estudios previos que muestran la capacidad de *Sargassum* spp. de acumular As, principalmente en formas orgánicas menos tóxicas (Ortega-Flores *et al*., 2023; Mamun *et al*., 2019). Sin embargo, bajo

condiciones alcalinas y anóxicas, estas especies pueden transformarse en formas inorgánicas más tóxicas (As III), aumentando su movilidad y riesgo ambiental (Devault *et al.*, 2022). El arribo masivo de sargazo y su acumulación en playas representan un riesgo significativo para los acuíferos kársticos de la Península de Yucatán, que constituyen la principal fuente de agua para consumo humano (Bautista *et al.*, 2022). La permeabilidad de los suelos y rocas calizas facilita la infiltración de lixiviados ricos en As y otros metales (Cheng *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2019), incrementando el potencial de contaminación de sistemas subterráneos ecológicamente sensibles.

CONCLUSIONES

El estudio demuestra que la descomposición *in situ* del sargazo libera cantidades significativas de arsénico, especialmente durante las etapas iniciales de su descomposición. Este proceso representa un riesgo latente para los ecosistemas costeros y los acuíferos kársticos del Caribe mexicano. Por ello, se recomienda: a) implementar programas de monitoreo espacial y temporal que evalúen la liberación y movilidad del As; b) caracterizar las especies químicas del As en diferentes fases de descomposición; c) desarrollar y aplicar estrategias de confinamiento y remediación que reduzcan la biodisponibilidad y el transporte del As hacia sistemas vulnerables. Estos hallazgos contribuyen a comprender los impactos ambientales del sargazo y a proponer soluciones sostenibles para su manejo en la región.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo técnico de Javier Tadeo León, Gerardo Martínez-Jardines y Jaime Díaz Ortega, así como el financiamiento PAPIIT-DGAPA, UNAM (proyectos IN103617 y IN109323). Adicionalmente se agradece a Vanessa Robledo Hurtado y Marcos Maldonado Rodríguez del Instituto de Oceanografía del Golfo y Mar Caribe (IOGMC) de la Secretaría de Marina (SEMAR) y al Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía.

BIBLIOGRAFÍA

Abdool-Ghany, A.A., Pollier, C.G., Oehlert, A.M., Swart, P.K., Blare, T., Moore, K. & Solo-Gabriele, H.M. (2023). Assessing quality and beneficial uses of *Sargassum* compost. *Waste Management*, 171:545–556. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.09.030.

Akinnawo, S.O. (2023). Eutrophication: causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. *Environmental Challenges*, 12:100733. https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733.

Al Mamun, M.A., Omori, Y., Papry, R.I., Kosugi, C., Miki, O., Rahman, I.M.M., Mashio, A.S., Maki, T. & Hasegawa, H. (2019). Bioaccumulation and biotransformation of arsenic by the brown macroalga Sargassum patens C. Agardh in seawater: effects of phosphate and iron ions. *Journal of Applied Phycology*, 31:2669–2685. https://doi.org/10.1007/s10811-018-1721-x.

Aldana-Arana, D., Gil Cortés, T.P., Castillo Escalante, V. & Rodríguez-Martínez, R.E. (2024). Pelagic sargassum as a potential vector for microplastics into coastal ecosystems. *Phycology*, 4:139–152. https://doi.org/10.3390/phycology4010008.

Bauta, J., Calbrix, E., Capblancq, S., Cecutti, C., Peydecastaing, J., Delgado Raynaud, C., Rouilly, A., Simon, V., Vandenbossche, V., Vedrenne, E. & De Caro, P. (2024). Global chemical characterization of *Sargassum* spp.

seaweeds from different locations on Caribbean islands: a screening of organic compounds and heavy metals contents. *Phycology*, 4:190–212. https://doi.org/10.3390/phycology4020011.

Bautista, F., Aguilar, Y. & Gijón-Yescas, N. (2022). Pig farms in karst areas: how do we go from pollution to sustainability? *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25:093. https://doi.org/10.56369/tsaes.4154.

Chávez, V., Cuevas, E., Van Tussenbroek, B.I., Francisco, V., Estévez, M., Celis, L.B., Verónica, L., Masia, L. & Silva, R. (2020). Massive influx of pelagic Sargassum spp. on the coasts of the Mexican Caribbean 2014–2020: challenges and opportunities. *Water*, 12:2908. https://doi.org/10.3390/w12102908.

Cheng, K., Liu, Z., Xiong, K., He, Q., Li, Y., Cai, L. & Chen, Y. (2023). Migration of dissolved organic matter in the epikarst fissured soil of South China Karst. *Land*, 12:887. https://doi.org/10.3390/land12040887.

Choi, Y.Y., Lee, S.J., Lee, Y.J., Kim, H.S., Eom, J.S., Kim, S.C., Kim, E.T. & Lee, S.S. (2020). New challenges for efficient usage of Sargassum fusiforme for ruminant production. *Scientific Reports*, 10(1):1–13. https://doi.org/10.1038/s41598-020-76700-3.

Davis, D., Simister, R., Campbell, S., Marston, M., Bose, S., McQueen-Mason, S.J., Gomez, L.D., Gallimore, W.A. & Tonon, T. (2021). Biomass composition of the golden tide pelagic seaweeds *Sargassum fluitans* and *S. natans* (morphotypes I and VIII) to inform valorisation pathways. *Science of the Total Environment*, 762:143134. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143134.

Devault, D.A., Massat, F., Lambourdière, J., Maridakis, C., Dupuy, L., Péné-Annette, A. & Dolique, F. (2022). Micropollutant content of Sargassum drifted ashore: arsenic and chlordecone threat assessment and management recommendations for the Caribbean. *Environmental Science and Pollution Research*, 29:66315–66334. https://doi.org/10.1007/s11356-022-20300-3.

FAO & WHO. (2019). General Standards for Contaminants and Toxins in Food and Feed. *Codex Alimentarius International Food Standards*, CXS 193–1995. https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius

Guo, M., Song, W. & Tian, J. (2020). Biochar-facilitated soil remediation: mechanisms and efficacy variations. *Frontiers in Environmental Science*, 8:521512. https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.521512.

Johns, E.M., Lumpkin, R., Putman, N.F., Smith, R.H., Muller-Karger, F.E., Rueda-Roa, T.D., Hu, C., Wang, M., Brooks, M.T., Gramer, L.J. & Werner, F.E. (2020). The establishment of a pelagic sargassum population in the Tropical Atlantic: biological consequences of a basin-scale long distance dispersal event. *Progress in Oceanography*, 182:102269. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102269.

Mayers, J.J., Flynn, K.J. & Shields, R.J. (2013). Rapid determination of bulk microalgal biochemical composition by Fourier-Transform Infrared spectroscopy. *Bioresource Technology*, 148:215–220. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.133.

Olguin-Maciel, E., Leal-Bautista, R.M., Alzate-Gaviria, L., Domínguez-Maldonado, J. & Tapia-Tussell, R. (2022). Environmental impact of Sargassum spp. landings: an evaluation of leachate released from natural decomposition at Mexican Caribbean coast. *Environmental Science and Pollution Research*, 29:91071–91080. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22123-8.

Ortega-Camacho, D., Acosta-González, G., Sánchez-Trujillo, F. & Cejudo, E. (2023). Heavy metals in the sediments of urban sinkholes in Cancun, Quintana Roo. *Scientific Reports*, 13:1–14. https://doi.org/10.1038/s41598-023-34218-4.

Ortega-Flores, P.A., Gobert, T., Méndez-Rodríguez, L.C., Serviere-Zaragoza, E., Connan, S., Robledo, D., Freile-Pelegrín, Y. & Anda Montañez, W. (2023). Inorganic arsenic in holopelagic Sargassum spp. stranded in the Mexican Caribbean: seasonal variations and comparison with international regulations and guidelines. *Aquatic Botany*, 188:103674. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2023.103674.

BIODIVERSIDAD DE NEMÁTODOS DEL SUELO DE CONSERVACIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Hugo H. Mejía Madrid[1]; Ilse P. Salinas Peralta[2]

[1] 1ENES Juriquilla y Laboratorio de Nematología, Facultad de Ciencias, UNAM, Boulevard Juriquilla 3001, C.P. 76230 Querétaro, Querétaro, México.

[2] Unidad Universitaria de Secuenciación Masiva y Bioinformática, Laboratorio Nacional de Apoyo Tecnológico a las Ciencias Genómicas, Instituto de Biotecnología, UNAM, Av. Universidad 2001, Col. Chamilpa, C.P. 62210, Cuernavaca, Morelos.

Correo del autor de correspondencia: hugo_mejia_madrid@ciencias.unam.mx

RESUMEN

El Suelo de Conservación de la Ciudad de México (SCDF) es vital para la recarga de acuíferos y la provisión de servicios ecosistémicos. Aunque existen estudios sobre vertebrados y micorrizas, la microfauna del suelo, como los nemátodos, ha sido poco estudiada. Estos organismos son excelentes bioindicadores debido a su abundancia, diversidad trófica y sensibilidad a cambios ambientales. No obstante, su identificación morfológica requiere especialización, lo cual ha impulsado el uso de secuenciación masiva para análisis más eficientes. Este estudio evaluó la biodiversidad de nemátodos en dos zonas del SCDF: El Dinamo 3 (La Magdalena Contreras) y la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA), mediante identificación morfológica y secuenciación masiva con los amplicones 18S, 28S y COI. Los resultados mostraron una alta diversidad de MOTU (193 y 124, Dinamo 3 y REPSA respectivamente). Predominaron los bacterívoros, aunque en algunos casos destacaron los herbívoros, posiblemente juveniles de nemátodos endoparásitos. No se encontraron diferencias significativas entre los resultados morfológicos y moleculares, validando la secuenciación masiva. Sin embargo, se detectaron discrepancias en identificaciones debido a errores en bases de datos públicas, por lo que se usó SILVA para mayor precisión. Solo 0.9–14.4% de las secuencias se compartieron entre todos los amplicones, lo que sugiere que cada marcador captura distintos géneros. En este trabajo se pretende establecer la metagenética de nemátodos en México como herramienta para evaluar la salud del suelo y su biodiversidad. Futuros estudios podrían optimizar estas técnicas para aplicaciones en la restauración ecológica y monitoreo ambiental.

PALABRAS CLAVE: *Dinamos; metagenética; nemátoda; REPSA.*

INTRODUCCIÓN

El suelo de conservación de la Ciudad de México (SCDF) se refiere a aquellas zonas que por sus características ecológicas proveen servicios ambientales necesarios para el mantenimiento de la calidad de vida de la población en general de la Ciudad de México. El SCDF ocupa una extensión aproximada de 87,297.1 ha y se localiza principalmente al sur y surponiente del Distrito Federal. De acuerdo al atlas geográfico del suelo de

conservación del Distrito Federal (hoy Ciudad de México) (GDF, 2012) se reporta la diversidad de especies de distintos grupos de vertebrados terrestres (GDF, 2012). A pesar de considerarse reportes completos sobre el suelo de conservación, la información que existe sobre los organismos del suelo no está reportada, a pesar de los estudios que se han realizado sobre micorrizas. La microfauna se encuentra enteramente ausente en el estudio de esta región de recarga para los mantos acuíferos de la Ciudad de México. Varios grupos de su fauna deben utilizarse como bioindicadores de la salud del suelo. Estos organismos son los que entran en contacto directo con el suelo, aun más que la macrofauna (vertebrados). Destacan entre éstos los metazoarios del Phylum Nematoda (Ferris, 2010a, b y literatura incluida). El principal obstáculo para el estudio de los nemátodos como bioindicadores es la especialización que se requiere para su identificación morfológica (Sánchez-Moreno y Ferris, 2018). Esto ha tratado de saldarse con la implementación de las tecnologías de secuenciación masiva (Porazinska *et al*., 2009 y 2012; Hayden *et al*., 2025) con el objetivo de utilizar esta información para determinar el estado de salud del suelo. El primer paso que debe darse para llegar a este tipo de estudios funcionales es a través de la secuenciación masiva y el ajuste entre la abundancia relativa de las MOTU (≈ especies) de los nemátodos secuenciados y la abundancia total que se obtiene del conteo de los nemátodos de las mismas muestras. Esto se ha realizado en los trabajos citados con resultados positivos (Villegas *et al*., 2024). Tabla 1. Valores porcentuales de los grupos tróficos de nemátodos del suelo de conservación de dos sitios al sur de la Ciudad de México.

El objetivo del presente trabajo fue medir la biodiversidad de nemátodos en suelos de conservación del sur de la Ciudad de México colectados durante la época de secas en el Dinamo 3, Alcaldía La Magdalena Contreras y en el núcleo poniente de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) a través de la comparación de la abundancia total de muestras del suelo para identificación taxonómica y la abundancia relativa de muestras ambientales calculada con la secuenciación masiva con los marcadores moleculares o amplicones 18S, 28S y COI.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de colecta y extracción de muestras. El material para procesamiento se obtuvo de dos colectas de suelo con 24 muestras en época de secas en 2023 en el Dinamo 3 situado entre los 19°16'58.53"N, 99°16'45.72" W y 19°16'57.11"N, 99°16'48.08" W y 12 muestras en 2024 en la REPSA, zona núcleo poniente situada entre 19º 19’3.788’’ N, 99º 11’ 30.749’’ W y 19º 18' 43.859" N, 99º 11' 26.124" W. El material se extrajo con embudos de Baermann. Cada elutriado se concentró en 200 mL con agua corriente y se almacenó en frascos viales a 4 ºC. Las muestras ambientales se colectaron en 1.5 ml en tubos Eppendorf, se fijaron en alcohol 96% y se congelaron a -20 ºC hasta su procesamiento en el Instituto de Biotecnología (IBT) de la UNAM. Se utilizó un microscopio Zeiss para el conteo y la identificación de los nemátodos a nivel de género. Estos géneros se agruparon en los distintos grupos tróficos de los nemátodos: bacterívoros, fungívoros, herbívoros, omnívoros y carnívoros. Para la secuenciación se procesaron 12 muestras del Dinamo 3 y 5 muestras de la REPSA. Se utilizaron varios pares de amplicones generales para el 18S y

COI; para el LSU se utilizaron amplicones específicos para los dominios 1-12. Para 18S y COI se utilizó la Plataforma NexSeq500 con el kit Nextera XT v2 y para el 28S se utilizó la Plataforma Oxford Nanopore con el kit EXP-NBD196. En cada caso se realizaron 100, 000 búsquedas por secuencia. Para analizar los datos de secuenciación se utilizó el programa FastQC en el módulo Overrepresented Sequences y se tomaron en cuenta las secuencias que representaron más del 0.1% del total. La base de datos utilizada para identificar las secuencias fue SILVA para los amplicones ribosomales y para el COI se refirió al GenBank. Las comparaciones estadísticas se realizaron con conteos producto de los elutriados de Baermann. Para realizar la comparación entre los resultados de la abundancia relativa y la absoluta se utilizó una t de Student con valor crítico de alpha=0.05. Con los datos de la búsqueda de secuencias se obtuvieron curvas de rarefacción con la frecuencia de las búsquedas en las que se encontraron los MOTU.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados se refieren al Cuadro 1. Se identificaron 7084.0 (13.4 ± 42.4) individuos en 100 g de suelo seco el Dinamo 3 repartidos en 23 géneros y 16310.3 (23.4 ± 121.6) en 42 géneros en la REPSA. Se obtuvieron del amplicón 18S en total 193 MOTU del Dinamo 3 y 124 de la REPSA; 28S, 784 Dinamo 3, 553 REPSA; COI, 166 Dinamo 3 y 96 REPSA. En la Tabla 1 se puede observar que la mayoría de los grupos tróficos se concentraron en los bacterívoros, excepto con el amplicón 18S, donde predominaron los herbívoros. La relativa desproporción observada en este caso se puede deber al número de juveniles de herbívoros encontrados, probablemente relacionados a las fases de vida libres de nemátodos endoparásitos. El resto de las proporciones encontradas son relativamente semejantes a lo esperado en los suelos del mundo (van den Hoogen et al., 2019). En cuanto a lo encontrado morfológicamente, las proporciones de nemátodos identificados y los secuenciados no presentaron diferencias significativas (t de Student, g.l. =4, p=0.89 REPSA 18S; p=0.89 Dinamo 3 para el 18S; p=0.91 REPSA COI; p=0.945 Dinamo 3 COI; p=0.75 REPSA 28S y p=0.88 Dinamo 3 28S. Esto quiere decir que el uso de la secuenciación masiva es útil en cuanto al ahorro de la especialización en la taxonomía de los nemátodos. Sin embargo, es necesario todavía identificar morfológicamente a los nemátodos debido a que las bases de datos públicas como GenBank, contienen errores de identificación que no empatan con la secuencia que declaran. En el presente trabajo existen discrepancias entre los géneros de nemátodos identificados y los MOTU secuenciados. Este ha sido un problema que se ha venido dejando de lado con algunas excepciones. En el presente caso se utilizó la base de datos SILVA para los amplicones ribosomales que tiene el nivel de curación más confiable para el empate entre secuencias y nemátodos identificados. Los resultados presentados concuerdan con lo dicho por varios autores que han utilizado estas mismas metodologías, con algunas discrepancias (Gendron *et al*., 2023; Ahmed *et al*., 2019; Porazinska *et al*., 2012 y 2009). En cuanto a la diversidad de las lecturas se puede observar que las curvas se saturaron para algunas muestras, como es el caso del amplicón COI, lo cual indica que es posible que se hayan muestreado cerca del total de MOTU presentes. Asimismo, esto se traduce en que en este campo de la sistemática hay muchas posibilidades de descubrir nuevas especies.

Cuadro 1. Valores porcentuales de los grupos tróficos de nemátodos del suelo de conservación de dos sitios al sur de la Ciudad de México.

	18S		COI		28S		Morfología	
Grupo trófico	**REPSA**	**Dinamo3**	**REPSA**	**Dinamo3**	**REPSA**	**Dinamo3**	**REPSA**	**Dinamo3**
Bacterívoros	39.5	18.7	37.4	16.3	71.9	61.7	61.53	39.7
Fungívoros	17.4	3.0	28.5	54.7	2.8	3.5	10.73	2.7
Herbívoros	42.2	49.4	15.8	27.8	20.6	32.0	21.00	48.8
Omnívoros	0.6	0.3	18.4	1.1	1.0	0.6	1.46	5.6
Carnívoros	0.4	28.6	0.0	0.1	3.7	2.2	5.29	3.2

CONCLUSIONES

Las implicaciones de la enorme biodiversidad de nemátodos, si se le compara con otros trabajos realizados en otras latitudes, es de relevancia pues indica que la biodiversidad del suelo es mayor de lo que se había encontrado hasta ahora. Se debe hacer el uso de más de un amplicón al realizar secuenciados masivos de muestras de suelo. En este caso se ha demostrado que el uso de secuenciación masiva abre la posibilidad de utilizar esta información para posteriores evaluaciones de la salud del suelo más rigurosas basadas en las abundancias diferenciales de los nemátodos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Fidel Alejandro Sánchez Flores de la Unidad Universitaria de Secuenciación Masiva y Bioinformática (UUSMB) del IBT por la secuenciación de las muestras ambientales. HHMM agradece el apoyo al proyecto DGAPA PAPIIT-IN217623 "Estudio de las comunidades de nemátodos en suelos del sur de la Ciudad de México". HHMM asimismo agradece la beca SNII-SECIHTI 43282.

BIBLIOGRAFÍA

Ahmed, M. et al., (2019). Metabarcoding of soil nematodes: the importance of taxonomic coverage and availability of reference sequences in choosing suitable marker(s) *Metabarcoding and Metagenomics* 3: 77–99 DOI 10.3897/mbmg.3.36408.

Ferris, H. (2010a). Contribution of nematodes to the structure and function of the soil food web. *Journal of Nematology* 42: 63–67.

Ferris, H. (2010b). Form and function: Metabolic footprints of nematodes in the soil food web. European Journal of Soil Biology, 46:97-104.

Ferris, H. (2010b). Form and function: Metabolic footprints of nematodes in the soil food web. European Journal of Soil Biology, 46:97-104.

Gendron, E.M. (2023). Nematode mitochondrial metagenomics: A new tool for biodiversity analysis. *Molecular Ecology Resources* 23:975–989. DOI: 10.1111/1755-0998.13761

Hayden, H.L., *et al*., (2025). Advancing the use of metabarcoding derived nematode-based indices as soil health bioindicators in agricultural and natural environments, Soil Biology and Biochemistry, https://doi.org/10.1016/j.soilbio..109772.

Mejía-Madrid, H. H. (2018). Soil nematode abundance and diversity from four vegetation types in Central Mexico. *Nematology,* 20:15-32.

Porazinska *et al.,* (2009). Evaluating high-throughput sequencing as a method for metagenomic analysis of nematode diversity. *Molecular Ecology Resources,* 9, 1439–1450 doi: 10.1111/j.1755-0998.2009.02611.x.

Porazinska *et al.,* (2012). Nematode Spatial and Ecological Patterns from Tropicaland Temperate Rainforests PLOS ONE e44641.

Sánchez-Moreno, S. *et al.,* (2018). Chapter 3. Nematode Ecology and Soil Health. In: Plant Parasitic Nematodes in Subtropical and Tropical Agriculture (eds R.A. Sikora et al.) pp. 62-86.

Van den Hoogen, J. *et al.,* (2019). Soil nematode abundance and functional group composition at a global scale. Nature 572, 194-198 doi.org/10.1038/s41586-019-1418-6.

Villegas, *et al.,* (2024). Soil biodiversity in the Atacama Desert shows distinct patterns at different diversity levels. bioRxiv 1-9. https://doi.org/10.1101/2024.09.30.615889.

CONSORCIOS BACTERIANOS CON PROMOCIÓN DE CRECIMIENTO VEGETAL Y SU EFECTO EN EL CRECIMIENTO EN JITOMATE (*Solanum lycopersicum*)

Adilene Velázquez Medina[1]; Evangelina Quiñones Aguilar[2]; Ernestina Gutiérrez Vazquez[1]; Nuria Gómez Dorantes[1]; Gabriel Rincón Enríquez[2]; Luis López Pérez[1]

[1] Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Km 9.5 carretera Morelia-Zinapécuaro, Tarímbaro Michoacán México C.P. 58880.
[2] Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C. Av. Normalistas 800 Colinas de la Normal, Guadalajara Jalisco México C.P. 44270.

Correo del autor de correspondencia: luis.lopez.perez@umich.mx

RESUMEN

En México, el jitomate (*Solanum lycopersicum*) tiene una elevada demanda de producción y para atenderla, se requiere de altas cantidades de fertilizantes; lo cual ha generado una degradación de los suelos. Una alternativa a la fertilización química es la aplicación de aislados o consorcios bacterianos (CB), con promoción de crecimiento vegetal (PCV), que satisfagan la demanda de nutrientes por el cultivo. Por lo tanto, en esta investigación se tuvo como objetivo, evaluar el efecto de consorcios de aislados bacterianos rizosféricos con PCV, sobre el crecimiento en jitomate. Se seleccionaron tres distintos consorcios (CB1, CB2 y CB3), de bacterias con PCV; y como controles se tuvieron, uno absoluto sin bacterias y uno con fertilización química (CQ). Se establecieron en invernadero, macetas de 1 kg con una planta de jitomate, a las cuales se les aplicaron los distintos CB y los respectivos controles. Los CB, se inocularon cada quince días por dos meses y medio en la base del tallo de las plantas. Al final del experimento, se evaluó altura de planta, longitud radical, área foliar y peso seco total. Los resultados mostraron que, las plantas inoculadas con los tres aislados obtuvieron el mismo crecimiento que las que fueron tratadas con la fertilización química, las cuales superaron estadísticamente ($P<0.05$), al control sin inoculación ni fertilización. En conclusión, los consorcios bacterianos, tiene el mismo efecto en el crecimiento del jitomate que la fertilización química, lo cual indicaría que podrían ser utilizados para reducir el uso de la fertilización en el jitomate.

PALABRAS CLAVE: *fijación de nitrógeno atmosférico; solubilización de fosfatos; calcio; suelos.*

INTRODUCCIÓN

La producción de jitomate (*Solanum lycopersicum*), tiene alta demanda en México, ya que es una hortaliza con importancia en la dieta de los mexicanos (Sánchez-Gómez *et al*., 2024). Para cubrir la producción de jitomate en los cultivos se suelen aplicar elevadas dosis de fertilización química, la cual ha ocasionado distintos problemas de contaminación ambiental y de salud a los productores; aunado a esto los suelos donde se produce el jitomate han tenido una disminución significativa de materia orgánica de las

poblaciones de microrganismos lo que conlleva a la pérdida de fertilidad biológica de los suelos (Bustos *et al.,* 2017). Una de las alternativas amigables con los suelos, es aplicar aislados y consorcios de bacterias rizosféricas que tengan el potencial de ayudar a las plantas a potencializar su crecimiento, en la literatura se menciona que las bacterias que se encuentran en la rizósfera de las plantas poseen mecanismos de promoción de crecimiento vegetal (PCV), ya que se apoyan mutuamente (Hernández-Valladares *et al*., 2021). Las raíces de las plantas producen exudados radicales ricos en aminoácidos, proteínas y azucares, los cuales las bacterias rizosféricas los toman y les sirven como alimento para poder realizar mecanismos directos de PCV como, la fijación de nitrógeno atmosférico (FNA), solubilización de fosfato (SF) y de calcio (SC), entre otros y así aportarles estos nutrientes disponibles a las raíces de las plantas (Nemeskéri *et al.*, 2022). Existen investigaciones donde han reportado el efecto benéfico de la inoculación de bacterias rizosféricas con PCV en jitomate, Moustaine et al. (2017), inocularon plantas de jitomate con dos aislados bacterianos fijadores de nitrógeno atmosférico, un aislado bacteriano con la capacidad de SF y FNA, estos aislados registraron, entre 100 y 120 cm de altura de la planta (AP) y 37 a 43 cm de longitud radical (LR) de jitomate, valores estadísticamente diferentes a las plantas sin inocular que alcanzaron 80 cm de AP y 30 cm de LR. Cirillo et al. (2023), inocularon con *Azotobacter chorrococcum* que realiza el mecanismo de FNA, *Trichoderma afroharzianum* y *T. harzianum* como SP, en jitomate y encontraron que la inoculación en consorcio registro 2410 g del peso total de la planta, mientras que el control con fertilización nitrogenada tuvo 310 g del peso total de la planta. Por lo anterior, esta investigación tuvo como objetivo, evaluar el efecto de consorcios de aislados bacterianos rizosféricos PCV en plantas de jitomate.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron siete aislados bacterianos provenientes de suelos de parcelas de aguacate con manejo convencional y orgánico con clave: ABO-39, ABO-32, ABO-42, ABO-8, ABO-9, ABC-40 y ABC-11 del cepario del laboratorio de Ecofisiologia vegetal del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IIAF) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El aislado bacteriano ABO-39 registró potencial en fijación de nitrógeno atmosférico (FNA) y solubilización de fosfatos (SF), el aislado ABO-32 en SF y solubilización de calcio (SC), mientras que los aislados ABO-8 y ABO-9 registraron FNA, el ABC-40 SF y ABO-42 con el ABC-11 SC. Los aislados bacterianos se reactivaron en agar nutritivo (peptona de caseína 5 gL^{-1}; extracto de levadura 3 gL^{-1}; a pH 6.8) con anti-fúngico Tecto®60 (Syngenta), se incubaron a 30°C/36 h, hasta su utilización. Con estos aislados se elaboraron tres consorcios, CB1 (ABO39, ABO32 y ABO42), CB2 (ABO8, ABO39 y ABO32) y CB3 (ABO9, ABC40 y ABC11). Semillas de jitomate previamente desinfectadas (Márquez-Benavidez *et al*., 2017), se inocularon con una concentración de 1 $x10^8$ $UFC.mL^{-1}$ (Sánchez-López *et al*., 2014), se dejaron en agitación por 40 min, después de ese tiempo se realizó la siembra en las macetas. Las macetas contenían 1 kg de suelo agrícola estéril como medio de crecimiento. Posteriormente, se inoculó cada quince días durante dos meses y medio, todas las plantas que fueron tratadas con los CB. Todas las plantas se mantuvieron en invernadero y se regaron con agua desionizada a capacidad de campo,

excepto el control químico que consistió en la aplicación de la solución nutritiva. Se diseñó un experimento completamente al azar, donde como factor se tuvieron los tres consorcios (CB1, CB2 y CB3), y además se establecieron dos controles, uno absoluto (sin consorcios ni fertilización) y otro químico que consistió en la aplicación de una solución nutritiva Hoagland al 50 % (Caniguante *et al.,* 2009). Se generaron cinco tratamientos cada uno se repitió 10 veces. La unidad experimental fue una planta de jitomate con capacidad de 1 kg. Al final del experimento, se realizó muestreo destructivo donde se registró la altura de planta (AP), longitud radical (LR), área foliar (AF) y peso seco total (PST). A los datos registrados se les realizó pruebas de distribución normal, homocedasticidad de varianzas para cumplir los criterios y se realizaron ANOVAS de una vía y para determinar diferencias estadísticas entre tratamientos se utilizó la prueba múltiple de medias de Tukey, ambos con una $P<0.05$. Los análisis se realizaron en el paquete estadístico Statgraphics XV (2005).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la altura de planta, los consorcios CB1, CB2, CB3 y el control químico, resultaron estadísticamente iguales, y en promedio, registraron 40.38 cm de AP, el cual resultó estadísticamente diferentes a la AP registrado en las plantas del control absoluto. Para la longitud de raíz, las plantas que fueron tratadas con CB1 y CB2 tuvieron estadísticamente la mayor LR, siendo en promedio 3 cm mayor que los restantes tratamientos. En el área foliar, se encontró una respuesta igual que para la LR, siendo CB1 y CB2 los que registraron estadísticamente la mayor AF, teniendo en promedio 48 cm^2 más superficie foliar. Finalmente, para el peso seco total se encontró que hubo diferencia estadística significativa entre el PST registrado en los tres CB y ambos controles, en promedio los CB registraron en promedio el mayor PST con 12.49 g, siendo 6% mayor al peso alcanzado en el control químico y 20% a lo registrado en las plantas del control absoluto (Cuadro 1).

Cuadro 1. Efecto de consorcios de aislados bacterianos rizosféricos promotores de crecimiento vegetal en jitomate

Tratamientos	Altura de planta cm	Longitud radical cm	Área foliar cm^2	Peso seco total g
CB 1	40.77[a]	14.36[a]	396.14[a]	12.06[a]
CB 2	39.75[a]	14.83[a]	409.17[a]	12.61[a]
CB 3	40.62[a]	13.88[b]	377.99[b]	12.82[a]
Control absoluto	35.14[b]	12.7[c]	317.4[c]	9.92[c]
Control Químico	39.6[a]	13.08[b]	373.64[b]	11.72[b]

CB: Consorcio bacteriano. Letras distintas en medias por columnas, indican diferencia significativa (Tukey $P<0.05$).

Los resultados de crecimiento vegetal obtenidos con los CB indicarían que las bacterias estuvieron activando sus mecanismos de promoción para abastecer de nitrógeno, fósforo y calcio a las platas de jitomate, pues se alcanzó e inclusive superó el valor en algunas variables de crecimiento a lo registrado en las plantas tratadas con solución nutritiva. Estos resultados coinciden con lo reportado por Desai *et al.* (2020) y Pattani *et al*. (2023)

quienes mencionan que la utilización de consorcios bacterianos aumenta los mecanismos de PCV y mejora el crecimiento de las plantas, al poner en formas disponibles elementos esenciales como el fósforo y calcio y fijar nitrógeno atmosférico, además de otros mecanismos como producción de auxinas y giberilinas.

CONCLUSIONES

La utilización de consorcios bacterianos rizosféricos con mecanismos de PCV como fijación de nitrógeno, solubilización de nutrientes (fósforo y calcio), puede ser una alternativa prometedora para ser usados como biofertilizantes en la producción de jitomate y de este modo reducir el uso de fertilizantes químicos, ya que han demostrado obtener el mismo crecimiento vegetal. Así mismo, el uso de consorcios bacterianos puede mejorar la salud y calidad del suelo al incrementar su fertilidad biológica y disminuir su degradación.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por los proyectos: "Evaluación de microorganismos rizosféricos en el desarrollo y sanidad de plantas de importancia comercial" y "Uso de bioefectores en el crecimiento y desarrollo de especies vegetales de interés agrícola del estado de Michoacán" financiados por la Coordinación de la investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; y los proyectos FCCHTI23_ME-4.1.-0028 UMSNH/DVSS/87/202 y "FCCHTI23_ME-4.1.-0011/UMSNH/DVSS/77/2023", financiados por el Instituto de Ciencia y Tecnología de Michoacán (ICTI). El primer autor agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por la beca otorgada durante el periodo 2022-2024 para la realización de estudios de maestría.

BIBLIOGRAFÍA

Bustos Barrera, E. E., Solís Oba, M., Castro Rivera, R., Ocaranza Sánchez, E., Tapia López, L., García Barrera, L. J. & Solís Oba, A. (2017). Estudio comparativo del cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) bajo diferentes esquemas de fertilización. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *8*(5), 1195-1201.

Caniguante Rivera, S., Pizarro Arce, L., Pacheco Cartagena, P. & Bastías Marín, E. (2009). Respuesta de los cvs. de tomate (*Solanum lycopersicum* L.)" Poncho Negro" y Naomi en diferentes condiciones de crecimiento y la aplicación de un bioestimulante natural Fartum® en condiciones de salinidad. *Idesia (Arica)*, *27*(3), 19-28.

Cirillo, V., Romano, I., Woo, S. L., Di Stasio, E., Lombardi, N., Comite, E. & Maggio, A. (2023). Inoculation with a microbial consortium increases soil microbial diversity and improves agronomic traits of tomato under water and nitrogen deficiency. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1304627.

Desai, S., Bagyaraj, D. J. & Ashwin, R. (2020). Inoculation with microbial consortium promotes growth of tomato and capsicum seedlings raised in pro trays. *Proceedings of the national academy of sciences, India Section B: Biological Sciences*, *90*(1), 21-28.

Hernández-Valladares, N. L., Palemón-Alberto, F., Damián-Nava, A., Cruz-Lagunas, B., Herrera-Castro, N. D., Ortega-Acosta, S. Á., ... & Reyes-García, G. (2021). Inoculación de bacterias promotoras de crecimiento vegetal y su efecto en ecotipos de tomate. *Revista fitotecnia mexicana*, *44*(4), 581-589.

Márquez-Benavidez, L., Rizo-León, M. Á., Montaño-Arias, N. M., Ruiz-Nájera, R. & Sánchez-Yáñez, J. M. (2017). Respuesta de *Phaseolus vulgaris* a la inoculación de diferentes dosis de *Trichoderma harzianum* con el fertilizante nitrogenado reducido al 50%. *Journal of the Selva Andina Research Society*, *8*(2), 125-134.

Moustaine, M., Elkahkahi, R., Benbouazza, A., Benkirane, R. & Achbani, E. H. (2017). Effect of plant growth promoting rhizobacterial (PGPR) inoculation on growth in tomato (Solanum lycopersicum L.) and characterization for direct PGP abilities in Morocco. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, *2*(2), 238708.

Nemeskéri, E., Horváth, K. Z., Andryei, B., Ilahy, R., Takács, S., Neményi, A., ... & Helyes, L. (2022). Impact of plant growth-promoting rhizobacteria inoculation on the physiological response and productivity traits of field-grown tomatoes in Hungary. *Horticulturae*, *8*(7), 641.

Pattani, V., Kaneriya, J., Joshi, K., Gandhi, D. & Sanghvi, G. (2023). Effect of growth-promoting bacterial consortia on overall growth of tomato plants. *Applied Biochemistry and Microbiology*, *59*(4), 511-521.

Sánchez-López, D.B., García Hoyos, A.M., Romero Perdomo, F.A. & Bonilla Buitrago, R. R. (2014). Efecto de rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal solubilizadoras de fosfato en *Lactuca sativa* cultivar White Boston. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *16*(2), 122-128.

Sánchez-Gómez, C., Caamal-Cauich, I. & Pat-Fernández, V.G. (2024). Soberanía alimentaria en la producción y comercialización de hortalizas nativas de México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *15*(6), 1-12.

ESTRUCTURA DE LAS COMUNIDADES DE PROTOZOOS EN ECTOMICORRIZAS NATIVAS INOCULADAS EN *Pinus montezumae*

Maryeli Aguirre Zamora[1]; Salvador Rodríguez Zaragoza[2]; Irma Díaz Aguilar[1]; Jesús Pérez Moreno[1]; Juan José Almaraz Suárez[1]

[1]Laboratorio de Ecología de Suelos, Microbiología de Suelos, Posgrado en Edafología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

[2]Laboratorio de Ecología Microbiana, Unidad de Biotecnología y Prototipos, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Autónoma de México, Tlanepantla, Ciudad de México.

Correo del autor de correspondencia: maryeli23a03@gmail.com

RESUMEN

En la comunidad de Piedra Canteada, Tlaxcala, es común utilizar suelo forestal no esterilizado como sustrato en vivero, lo que favorece la asociación de las plantas con hongos ectomicorrízicos nativos y su microbioma. Las micorrizas y los protozoos mejoran la supervivencia y adaptación de los árboles después del trasplante, sin embargo, la composición de las comunidades de protozoos del suelo en las raíces ectomicorrizadas son poco conocidas. En este estudio se evaluó la influencia de tres morfotipos de hongos ectomicorrízicos *Tylospora* sp., *Aureoboletus* sp. y *Cenococcum geophilum* en la estructura de las comunidades de protozoos asociadas a *Pinus montezumae* bajo condiciones de vivero. Aunque la riqueza y diversidad total de protozoos no mostró diferencias significativas entre las ectomicorrizas, la composición de especies de protozoos fue diferente. La comunidad de protozoos asociada con *Tylospora* sp. presentó la mayor diferenciación, mientras que *Aureoboletus* sp. y *C. geophilum* compartieron más especies. Estos resultados sugieren que la especie de hongo ectomicorrízico influye principalmente en la composición de las comunidades de protozoos.

PALABRAS CLAVE: *Composición de las comunidades; diversidad; interacciones; microfauna; morfotipos.*

INTRODUCCIÓN

El Centro Ecoturístico y Área Natural Protegida Piedra Canteada, ubicado en San Felipe Hidalgo, Nanacamilpa, Tlaxcala, tiene 632 hectáreas de bosque y ha sido reconocido como Área Natural Protegida desde 1990 (Flores, 2020). El manejo forestal sostenible ha sido una estrategia que ha permitido la conservación de los recursos naturales del sitio, cuya diversidad aún está poco estudiada. El suelo de la zona alberga inóculos de hongos ectomicorrízicos nativos, que se encuentran en el ecosistema local y que establecen asociaciones mutualistas con sus hospederos (Karlsen-Ayala *et al*., 2022). Además, contiene un incontable número de microorganismos edáficos, como bacterias y protozoos, que influencian la disponibilidad de nutrientes para los árboles (Lüttge, 2022).

En Piedra Canteada, es una práctica común utilizar suelo forestal no esterilizado como sustrato para la producción de plantas en vivero. Esta práctica favorece la adaptación y

el desarrollo de las plantas jóvenes una vez trasplantadas en campo, ya que los hongos ectomicorrízicos nativos, en conjunto con su microbioma, mejoran significativamente la supervivencia de los árboles después del trasplante (Simard *et al*., 2003; Pérez-Moreno y Martínez-Reyes, 2014). A pesar de que los protozoos no están involucrados en la simbiosis micorrízica, estos organismos son componentes esenciales del microbioma del suelo. No obstante, el conocimiento disponible sobre los efectos de las ectomicorrizas en las comunidades de protozoos sigue siendo limitado y, en algunos casos, contradictorio, ya que los estudios no siempre coinciden en cuanto a la presencia y dinámica de los protozoos en la zona de raíces micorrizadas (Timonen *et al*., 2004).

La pregunta de investigación es si diferentes morfotipos de ectomicorriza tienen comunidades de protozoos distintas en la zona de raíces. Por ello, el objetivo de este estudio fue determinar la diversidad alfa, beta y la estructura de las comunidades de protozoos presentes en tres diferentes ectomicorrizas nativas de *Pinus montezumae*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención de inóculos nativos. Se tomaron árboles de *Pinus montezumae* (de 5 años) del vivero rústico comunitario del Centro Eco-turístico y Área Natural Protegida de Piedra Canteada, en San Felipe Hidalgo, Nanacamilpa, Tlaxcala, México (19º 27' 27" N, 98º 36' 32" O) (INEGI, 2021). Los árboles presentaban tres ectomicorrizas nativas dominantes: *Aureoboletus* sp. (morfotipo blanco), *Cennoccocum geophilum* (morfotipo negro) y *Tylospora* sp. (morfotipo amarillo). Los cepellones fueron clasificados y separados de acuerdo con las características del micelio y posteriormente se realizó la identificación morfológica y molecular de cada morfotipo.

Diseño experimental. Se definieron tres tratamientos: 1) plantas con el morfotipo amarillo (*Tylospora* sp.); 2) plantas con el morfotipo blanco (*Aureoboletus* sp.) y 3) plantas con el morfotipo negro (*Cennoccocum geophilum*), con 5 repeticiones, seleccionadas al azar, para analizar la comunidad inicial de protozoos en cada morfotipo.

Evaluación de protozoos. La riqueza de especies y la abundancia relativa de protozoos se determinaron mediante el método de Placa de Petri saturada pero no inundada (Bamforth, 1992), modificado por Mondragón-Camarillo (2020). El agua recuperada se centrifugó en tubos eppendorf a 300 rpm durante 5 minutos. Posteriormente, se examinaron todos los sedimentos (aproximadamente 100 µl por placa) en un microscopio de contraste de fases y se registraron los morfotipos de ciliados y flagelados encontrados. Estos se observaron vivos en aumentos de 40 a 100 X y se tomaron videos de sus movimientos característicos que proporcionan información para su identificación morfológica basada en claves taxonómicas (Jeuck y Arndt, 2013; Lee *et al*., 2000).

Análisis ecológicos. Se calcularon los índices de diversidad de Shannon-Wiener (H'), de Simpson (1-D) y la diversidad beta (β) a partir de las frecuencias relativas de los protozoos registrados en cada morfotipo. Estos índices se emplearon para describir la diversidad de las comunidades y el recambio de especies en los tres inóculos ectomicorrízicos nativos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron un total de 12 morfoespecies de protozoos incluyendo a *Colpoda* sp., *Euplotes* sp., *Euglenido* sp., Cryptophyceae sp., *Blepharisma* sp., Litostomatea sp., *Bodo* sp., *Tetrahymena* sp., *Halteria* sp., *Stichotricha* sp.1, *Stichotricha* sp.2 y *Haptoria* sp. Estas especies, forman parte de distintos grupos funcionales y estrategias tróficas, conformando comunidades características en cada tratamiento.

Los tres morfotipos presentaron una riqueza de especies similar. En los tratamientos blanco y negro hubo 8 especies, mientras que el tratamiento amarillo presentó 7. Sin embargo, los protozoos encontrados no pertenecían a los mismos taxones. En los tres inóculos, *Bodo* sp. y *Litostomatea* sp. fueron las especies dominantes, con porcentajes que variaron de 14.8% a 20.8%. *Euplotes* sp. (17-19%) y *Euglenido* sp. (13-19%) solo fueron dominantes en los morfotipos blanco y negro, pero no en el amarillo, donde fueron sustituidos por *Colpoda* sp. (17%). Las especies comunes del morfotipo blanco fueron Cryptophyceae sp. (8%) y *Tetrahymena* sp. (8%), las del morfotipo negro *Colpoda* sp. (11%) y *Blepharisma* sp. (7.4%), y las del morfotipo amarillo *Euplotes* sp. (12.5%) y *Euglenido* sp. (12.5%). Las especies raras también fueron distintas en cada morfotipo, en el blanco se registraron *Blepharisma* sp. (4.1%) y *Halteria* sp. (4.1%); en el negro, Cryptophyceae sp. y *Stichotricha* sp.1 (ambas con 3.7%); mientras que en el amarillo se presentaron *Blepharisma* sp. (8.3%), *Stichotricha* sp. 2 (8.3%) y *Haptoria* sp. (4.1%). Estos cambios en la presencia o ausencia de ciertas especies evidencian una composición diferencial de especies entre tratamientos, a pesar de presentar un número de especies parecido.

Los índices de diversidad Shannon-Wiener (H′) y dominancia de Simpson (1-D) no mostraron diferencias entre los morfotipos (Cuadro 1). Específicamente, la comunidad de protozoos presentó una diversidad H′ moderada-alta en los morfotipos blanco y negro, mientras que el morfotipo amarillo mostró una diversidad H′ moderada. Esto también muestra que, aunque la riqueza y diversidad de especies fue similar entre inóculos, la composición de especies de protozoos fue diferente.

Cuadro 1. Índices de diversidad de las ectomicorrizas evaluadas.

	Índices de diversidad de protozoos	
Inóculo	**Shannon-Wiener (H′)**	**Dominancia de Simpson (1-D)**
Morfotipo blanco	2.0	0.88
Morfotipo negro	2.1	0.85
Morfotipo amarillo	1.99	0.85

Nota: Morfotipo blanco: *Aureoboletus* sp.; Morfotipo negro: *Cennoccocum geophilum* y Morfotipo amarillo: *Tylospora* sp.

Los valores de recambio de especies de protozoos más altos (diversidad beta (β)) se registraron entre el morfotipo amarillo y blanco (β = 11.01); así como, en el morfotipo amarillo y negro (β = 10.50), lo que disminuye la similitud entre ellos. En contraste, el menor recambio de especies se observó entre los morfotipos blanco y negro (β = 9.47), sugiriendo que estas comunidades comparten una mayor proporción de especies (Cuadro 2). La composición observada sugiere que la presencia o ausencia de

determinadas morfoespecies podría estar influenciada por factores asociados a las diferencias de las tres especies de hongos ectomicorrízicos y las interacciones microbianas resultantes en la rizosfera de *P. montezumae*. Posiblemente, esto ocurre a través de cambios en la disponibilidad de recursos alimenticios, microhábitats y condiciones fisicoquímicas en la rizosfera (Lüttge, 2022). Por tanto, estos ambientes selectivos podrían favorecer a ciertos taxones sobre otros.

Cuadro 2. Recambio de especies (diversidad beta) entre morfotipos.

Beta (β)	Morfotipo blanco	Morfotipo negro	Morfotipo amarillo
Morfotipo blanco	0	9.47	11.01
Morfotipo negro	9.47	0	10.50
Morfotipo amarillo	11.01	10.50	0

Nota: Morfotipo blanco: *Aureoboletus* sp.; Morfotipo negro: *Cennoccocum geophilum* y Morfotipo amarillo: *Tylospora* sp.

Las plantas, por sí mismas, seleccionan comunidades de microorganismos (hongos y bacterias) a través de sus exudados radicales (Marupakula *et al*., 2017). Sin embargo, la colonización por hongos ectomicorrízicos altera la composición de dichos exudados, variando según la especie de hongo que establezca la asociación mutualista con la planta hospedadora (Ingham y Massicotte, 1994). Estos cambios en la composición de los exudados pueden modificar la emisión y naturaleza de los compuestos volátiles orgánicos que atraen bacterias específicas hacia la zona radical (Wang *et al*., 2021). Dado que los protozoos del suelo se alimentan principalmente de bacterias (Rønn *et al*., 2012), las variaciones en la composición de las comunidades bacterianas presentes en la ectomicorrizósfera pueden influir en la estructuración de las comunidades de protistas en los tres tratamientos evaluados.

Fransson y Rosling (2014), mencionan que la morfología del micelio influye en el flujo de carbono en la zona radical, lo que puede constituir uno de los factores determinantes en la conformación de las comunidades microbianas. Al respecto, *Aureoboletus* sp. y *Tylospora* sp. tienen características morfológicas parecidas, como hifas hialinas, poco melanizadas, suaves y textura algodonosa (Taylor y Alexander, 1991). Por el contrario, el micelio de *C. geophilum* es denso, y con alta melanización (Almaraz-Llamas *et al*., 2019). Estas diferencias entre las ectomicorrizas puede ser factores que influyen en la composición de protozoos en la zona de raíces. Finalmente, las raíces micorrizadas proporcionan diversos microhábitats que los microorganismos del suelo pueden colonizar (Timonen *et al*., 2004). Esta diferencia en ambientes, puede estar relacionada con la variabilidad de morfoespecies de protozoos presentes en los tres inóculos evaluados.

CONCLUSIONES

Los índices de diversidad fueron similares en los tres morfotipos, mientras que la composición de especies de protozoos fue diferente. Además, la tasa de recambio de especies y la estructura de las comunidades de protozoos fueron diferentes. Lo anterior indica que la especie de hongo ectomicorrízico asociado a *Pinus montezumae* promueve el desarrollo de una comunidad distinta de protozoos.

BIBLIOGRAFÍA

Almaraz-Llamas, A., Pérez-Moreno, J., Torres-Aquino, M., Carcaño-Montiel, M. G. & Hernández Ríos, I. (2019). *Cenococcum geophilum* y su asociación con *Pinus maximartinezii* árbol nativo de México en peligro de extinción. *Scientia fungorum*, 49, 1-15. https://doi.org/10.33885/sf.2019.49.1222.

Bamforth, S.S. (1992). Sampling and enumerating soil protozoa. In A. T. Lee & J.J. Soldo (Eds.), Protocols in protozoology (p. B-5.1). Lawrence, Kansas: Allen Press.

Flores, R. (2020). Luciérnagas iluminan la conservación de un bosque en México. Mongabay. Recuperado de https://es.mongabay.com/2020/08/luciernagas-iluminan-la-conservacion-de-un-bosque-en-mexico/.

Fransson, P. & Rosling, A. (2014). Fungal and bacterial community responses to *Suillus* variegtus extraradical mycelia and soil profile in Scots pine microcosms. *Plant and soil* 385: 255-272. https://doi.org/10.1007/s11104-014-2231-5.

INEGI. (2021). Aspectos geográficos Tlaxcala / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 41 p. Recuperado de https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/areasgeograficas/resumen/resumen_29.pdf.

Ingham, E.R. & Massicotte, H.B. (1994). Protozoan communities around conifer roots colonized by ectomycorrhizal fungi. *Mycorrhiza* 5: 53-61.

Jeuck, A., & Arndt, H. (2013). A short guide to common heterotrophic flagellates of freshwater habitats based on the morphology of living organisms. *Annals of Anatomy*, 164, 842–860. https://doi.org/10.1016/j.protis.2013.08.003.

Karlsen-Ayala, E., Smith, M.E., Askey, B.C. & Gazis, R. (2022). Native ectomycorrhizal fungi from the endangered pine rocklands are superior symbionts to commercial inoculum for slash pine seedlings. *Mycorrhiza*, 32(5), 465-480. https://doi.org/10.1007/s00572-022-01092-3.

Lee, J.J., Leedale, G. F. & Bradbury, P.C., Phyllis C. (2000). An illustrated guide to the protozoa: organisms traditionally referred to as protozoa, or newly discovered groups. Society of Protozoologists.

Lüttge U. (2022). Holobionts in the plant kingdom. In Progress in Botany Vol. 83 (pp. 183-202). Cham: Springer International Publishing.

Marupakula, S., Mahmood, S., Jernberg, J., Nallanchakravarthula, S., Fahad, Z.A. & Finla,y R.D. 2017. Bacterial microbiomes of individual ectomycorrhizal *Pinus sylvestris* roots are shaped by soil horizon and differentially sensitive to nitrogen addition. *Environmental Microbiology* 19: 4736-4753.

Mondragón-Camarillo, L., Zaragoza, S.R., Mendoza-López, M.R., Cabirol, N. & Macek, M. (2020). Recovery of soil protozoan community structure promoted by *M. sativa* after a strong pulse of hydrocarbon contamination. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(6), 283. https://doi.org/10.1007/s11270-020-04618-7.

Pérez-Moreno, J. & Martínez-Reyes, M. (2014). Edible Ectomycorrhizal Mushrooms: Biofactories for Sustainable Development. In: Guevara-Gonzalez, R., Torres-Pacheco, I. (eds.) Biosystems Engineering: Biofactories for Food Production in the Century XXI. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03880-3_6.

Rønn, R., Vestergård, M. & Ekelund, F. (2012). Interactions between bacteria, protozoa and nematodes in soil. *Acta Protozoologica* 51: 3-9. 10.4467/16890027AP.12.018.0764.

Simard, S.W., Jones, M. D. & Durall, D.M. (2003). Carbon and Nutrient Fluxes Within and Between Mycorrhizal Plants. In: van der Heijden, M. G. A., & Sanders, I. R. (eds) Mycorrhizal Ecology. Ecological Studies, vol 157. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-38364-2_2.

Taylor, A.F.S. & Alexander, I.J. (1991). Ectomycorrhizal synthesis with *Tylospora fibrillosa*, a member of the Corticiaceae. *Mycological Research*, 95(3), 381-384. https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)81256-2

Timonen, S., Christensen, S. & Ekelund, F. (2004). Distribution of protozoa in scots pine mycorrhizospheres. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(7), 1087-1093. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.02.019.

Wang, Y., Wang, R. & Lu, B. (2021). Mycorrhization of *Quercus mongolica* seedlings by Tuber melanosporum alters root carbon exudation and rhizosphere bacterial communities. *Plant and Soil* 467, 391–403. https://doi.org/10.1007/s11104-021-05112-7.

CÁSCARA DE NUEZ PECANERA EN LA PRODUCCIÓN DE PLÁNTULAS DE CHILE JALAPEÑO

Ofelia Adriana Hernández Rodríguez[1]; Dámaris Leopoldina Ojeda Barrios[1]; Janeth Margarita Fuentes Téllez[1]; Oscar Cruz Álvarez[1]; Francisco Javier Piña Ramírez[1]

[1] Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua. Avenida Universidad y Avenida Pascual Orozco s/n, 31110, Chihuahua, Chih, México.

Correo del autor de correspondencia: aernande@uach.mx

RESUMEN

La cáscara de nuez pecanera (*Carya illinoinensis*) representa una problemática ambiental al ser desechada en grandes cantidades, por lo que el objetivo fue valorar su potencial en la elaboración de semicompostas para la producción de plántulas de chile jalapeño (*Capsicum annum*). El primer experimento fue la producción de semicompostas a partir de cáscara de nuez pecanera y estiércol equino. En un segundo experimento se utilizaron las semicompostas obtenidas como sustrato para semilleros de chile jalapeño cultivar M. Los resultados se evaluaron mediante un modelo completamente al azar y prueba de Tukey. Los resultados encontrados mostraron que someter la cáscara de nuez al proceso de semicompostaje permite eliminar características adversas en la cáscara, relacionadas a la concentración de sales y al contenido de compuestos ácidos y fitotóxicos. Además, con el uso de semicompostas obtenidas a partir de cáscara de nuez como sustrato de germinación de chile jalapeño, se obtuvieron resultados comparables a las de la turba, lo que constituye una posible alternativa para reducir la problemática ambiental que representa la generación y acumulación de la cáscara de nuez.

PALABRAS CLAVE: *Fitotoxicidad; semicomposta; sustrato*.

INTRODUCCIÓN

México ocupa los primeros lugares a nivel mundial en la producción de nuez pecanera (*Carya illinoinensis*), y el estado de Chihuahua es el principal productor con aproximadamente 103,271.78 t año^{-1} (SIAP, 2024). Esta actividad genera una gran cantidad de residuos, entre ellos la cáscara o endocarpio, que se genera al procesar la nuez para buscar un valor agregado en la almendra. Actualmente, la cáscara representa aproximadamente el 50% de la nuez y tiene poco o nulo valor comercial (Han *et al*., 2018).

Aun cuando parte de la cáscara de nuez encuentra diversos usos, la mayor parte no es procesada o dispuesta adecuadamente, y su acumulación contribuye a la contaminación ambiental (Trevizol *et al*., 2011) por contener compuestos ácidos, fitotóxicos hidrosolubles y sales, cuyas concentraciones dependerán de la calidad del agua de riego, tipo de manejo y fertilización, ciclos productivos "on" y "off" de cada huerto nogalero, al igual que a la variedad de nuez procesada (Flores-Córdova y Sánchez-Chávez, 2016).

El semicompostaje, el cual es un sistema que no cumple plenamente las características del compostaje porque no alcanza la fase termófila, ha sido empleado para la

transformación de los residuos orgánicos en abonos orgánicos de calidad, utilizados en la propagación de hortalizas (Hernández-Rodríguez, 2017), lo que puede representar una alternativa para la transformación de la cáscara de nuez pecanera. Por lo que el objetivo de este trabajo fue valorar el potencial de la cáscara de nuez pecanera (*Carya illinoinensis*) en la elaboración de semicompostas útiles como sustrato de propagación de plántulas de chile jalapeño (*Capsicum annum*).

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en la Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México, ubicado en 28° 39´ 25.3" N, 106° 05´ 13.5" O, con clasificación climatológica de clima seco estepario cálido (Bsh). La cáscara de nuez utilizada se recolectó de tres procesadoras: La Nogalera (LNO) ubicada en la carretera Jiménez-Parral, que procesa nuez de diferentes estados del país, Chipa Pecans Nut Company (CPN) comercializadora de la almendra de nuez, y Procesadora Jimenuez (JIM) que es el centro de acopio de nuez pecanera más grande de México, las dos últimas ubicadas en Cd. Jiménez, Chih.

Producción de semicompostas a partir de cáscara de nuez pecanera. La producción de semicompostas (SC) se realizó con una mezcla de cáscara de nuez con estiércol equino, utilizando 50/50 (v/v) de cada residuo para una relación C/N igual a 25/1. Las mezclas se colocaron en contenedores de plástico de 58 L, con seis perforaciones en la base y se regaron a criterio cada tercer día para mantener la humedad entre 50 y 60 %, la que se determinó mediante la prueba al tacto. Actividades de volteo manual de las mezclas fueron realizadas cada 28 d.

El diseño experimental consistió en los tratamientos: LNO-Semic, CPN-Semic y JIM-Semic, con 4 repeticiones, respectivamente. Las variables evaluadas en las SC a los 100 d de transformación fueron: pH en dilución con agua desionizada 1:10 (p/v), CE ($dS \cdot m^{-1}$) en dilución con agua desionizada 1:10 (p/v), e índice de germinación (IG:%) con el método descrito por Zucconi (1981).

El análisis estadístico se llevó a cabo mediante un modelo correspondiente a un DCA. Mediante el análisis de varianza del modelo ajustado se determinó la significancia de los efectos. Este análisis se realizó mediante Microsoft Office Excel 2019.

Uso de semicompostas producidas a partir de cáscara de nuez pecanera como sustrato para semilleros de chile jalapeño. Se estableció el experimento en un invernadero tipo capilla de baja tecnología, utilizando como sustratos para germinación de chile jalapeño cultivar Jalapeño M las SCs obtenidas en la etapa anterior al 100%, y mescladas con turba sphagnum (Tb), empacada y distribuida por Premier Tech Horticulture, pH de 4 a 4.5 y CE < 0.25 $dS \cdot m^{-1}$, en una relación 50/50 (v/v). El diseño experimental consistió en un DCA con 6 tratamientos: SC-LNO, SC-CPN, SC-JIM, SC-LNO+Tb, SC-CPN+Tb, SC-JIM+Tb, con 4 repeticiones cada uno, y Tb como testigo. Se utilizaron semillero de 200 alveolos con un volumen de 25 ml c/u, utilizando 120 cavidades para cada tratamiento y 30 para el testigo. Se depositó 1 semilla por cavidad.

Las variables evaluadas, 45 d después de la siembra, fueron: germinación (PG; %), altura de la plántula (ALT; cm), número de hojas (NH), diámetro de tallo (DT; mm), peso seco foliar (PSF; g) y peso seco de raíz (PSR; g). La calidad del adobe o cepellón (CCe) se evaluó al tirar del tallo para remover la plántula de la cavidad del semillero y determinar la estabilidad del sustrato, mediante la siguiente escala arbitraria: 1) 100% del cepellón permanece, 2) 90% del cepellón permanece, 3) 75% del cepellón permanece, 4) 50 % del cepellón se retira del semillero, y 5) se pierde más del 50% del cepellón o las raíces no contienen ningún sustrato.

El análisis estadístico se llevó a cabo mediante el ajuste del modelo correspondiente a un DCA con todos sus efectos principales y sus interacciones y comparación de medias con la prueba de Tukey ($P < 0.05$ con Microsoft Office Excel 2019.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producción de semicompostas a partir de cáscara de nuez. En el Cuadro 1 se muestran los resultados de las variables pH, IG y CE evaluadas en las SCs producidas.

Cuadro 1. Medias y desviación estándar de las variables evaluadas en las semicompostas producidas a partir de cáscara de nuez y estiércol equino.

Tratamiento	Semicomposta producida	pH	CE dS m^{-1}	IG %
LNO-Semic	SC-LNO	7.6+0.30	0.95+0.159	113.81+9.69
CPN-Semic	SC-CPN	7.9+0.07	0.92+0.317	114.09+14.52
JIM-Semic	SC-JIM	7.8+0.10	0.88+0.150	114.05+5.03

LNO: La Nogalera, CPN: Chipa Pecans Nut Company, JIM: Jimenuez, Semic: semicompostaje, SC: semicomposta, CE: conductividad eléctrica, IG: índice de germinación.

No se encontraron efectos significativos respecto a los tratamientos, lo que puede indicar que someter la cáscara de nuez al proceso de semicompostaje permite eliminar las características diferenciales de la cáscara de nuez proveniente de las diferentes descascaradoras, relacionadas a la concentración de sales y al contenido de compuestos ácidos y fitotóxicos presentes en la cáscara de nuez, los cuales pudieran repercutir en la germinación de especies sensibles (De la Rosa *et al*., 2011).

Los valores de pH registrados en las SCs fueron adecuados para su uso como sustrato de germinación, ya que valores por encima o debajo de 5.5 a 8.0, afectan la disponibilidad de nutrientes. Los valores obtenidos para la variable IG mostraron niveles nulos de fitotoxicidad, indicando su capacidad como sustrato agrícola de calidad. Finalmente, los valores de CE de las SCs obtenidas no representan un problema para su utilización como sustrato, debido a que se encuentran en el rango adecuado entre 0.7 y 2.0 $dS \cdot m^{-1}$.

Uso de semicompostas producidas a partir de cáscara de nuez pecanera como sustrato para semilleros de chile jalapeño. En el Cuadro 2 se muestran los resultados de las variables evaluadas en plántulas de chile jalapeño variedad Jalapeño M, al utilizar las SCs producidas en este estudio.

Cuadro 2. Comparación de medias para las variables evaluadas en plántulas de chile jalapeño var. Jalapeño M.

Tratamiento	PG (%)	ALT (cm)	NH	DT (mm)	PSF (g)	PSR (g)	CCe
SC-LNO	98.33±1.92	4.6±0.3	3.9±0.5	1.4±0.06abc	0.09±0.01ab	0.023±0.008bc	2.0+0.2b
SC-CPN	99.17±1.67	4.8±0.3	4.0±0.2	1.4±0.04a	0.10±0.01a	0.025±0.008ab	2.0+0.1b
SC-JIM	97.50±3.19	4.6±0.5	3.9±0.4	1.4±0.05bc	0.09±0.02b	0.020±0.009c	2.0+0.1b
SC-LNO+Tb	95.00±6.38	4.4±0.6	3.9±0.3	1.4±0.06c	0.09±0.02b	0.021±0.010c	2.0+0.1b
SC-CPN+Tb	94.17±4.19	4.6±0.5	4.0±0.3	1.4±0.05abc	0.10±0.01a	0.025±0.010ab	2.0+0.1b
SC-JIM+Tb	96.67±4.71	4.8±0.3	4.0±0.1	1.4±0.04a	0.10±0.01a	0.025±0.009ab	2.0+0.1b
Tb	93.33	4.8±0.3	3.9±0.4	1.4±0.04ab	0.10±0.01a	0.027±0.010a	1.6+0.5a

SC-LNO: semicomposta La Nogalera, SC-CPN: semicomposta Chipa Pecans Nut Company, SC-JIM: semicomposta Jimenuez, Tb: turba, PG: germinación, ALT: altura, NH: número de hojas, DT: diámetro del tallo, PSF: peso seco foliar, PSR: peso seco radicular, CCe: calidad de adobe. Letras diferentes en la misma columna son significativamente diferentes (Tukey $P < 0.05$).

Las variables PG, ALT y NH no mostraron diferencia significativa. El porcentaje de germinación fue de 96.31±1.78 representando un valor similar a los obtenidos por Hernández-Rodríguez *et al*. (2017), quienes reportaron un 93.5% de germinación de plántulas de lechuga con el uso de vermicomposta+turba en relación 2:1, y un 83% en plántulas de tomate. Los valores de la NH se situaron ligeramente por debajo a los señalados en la investigación realizada por Acevedo-Alcalá *et al.* (2020), en la que, al utilizar diferentes sustratos orgánicos para germinación de plántulas de chile poblano, registraron una media de 6 hojas a los 52 d después de la siembra.

El crecimiento de las plántulas de chile jalapeño mostró que la SC elaborada con cáscara de nuez puede ser utilizada como sustrato con buenos resultados, debido a que, exceptuando los tratamientos SC-JIM y S-LNO+T, los valores obtenidos para las variables DT, PSF y PSR fueron estadísticamente iguales a los de la Tb. Sin embargo, para el PSF y PSR, los valores registrados fueron inferiores respecto a los señalados por Acevedo-Alcalá *et al.* (2020), quienes al utilizar como sustratos para germinación de chile poblano diferentes mezclas de lombricomposta, estiércol vacuno, estiércol ovino, turba y vermiculita, obtuvieron los mejores valores con los tratamientos a base de lombricomposta y turba con valores en un rango 0.45 a 1.58 g dentro de un lapso de 52 d mientras que el PSR de las plántulas de chile poblano promediaron 0.57 g.

Los resultados para la variable CCe mostraron que los sustratos conformados por SC y SC+Tb, fueron estadísticamente inferiores respecto a Tb, el cual presentó un promedio de 1.64, en que según la escala de clasificación el 1.0 representa las mejores características (Hernández-Rodríguez *et al*., 2017), lo que significa asegurar la integridad de la raíz de la plántula de almacigo, mientras que las medias para el resto de los sustratos fueron estadísticamente iguales con valores qué según la escala de evaluación empleada, trata de sustratos en que el 90% del cepellón se retira de la cavidad de la bandeja. Lo anterior muestra una buena calidad de cepellón, a pesar de

que las SCs no alcanzaron una plena integración debido al tamaño del trozo de la cáscara de nuez utilizada en su elaboración.

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación muestran que someter la cáscara de nuez pecanera al proceso de semicompostaje permite reducir el efecto de las sales y los compuestos ácidos y fitotóxicos contenidos en ella, pudiendo ser una vía para su reutilización en la obtención de sustratos para producir plántulas de buena calidad, lo que constituye una posible alternativa para reducir la problemática ambiental que representa su acumulación.

AGRADECIMIENTO

A las descascaradoras La Nogalera, Chipa Pecans Nut Company y Procesadora Jiménez.

BIBLIOGRAFÍA

Acevedo-Alcalá P., Cruz-Hernández, J. & Taboada-Gaytán, O. (2020) Abonos orgánicos comerciales, estiércoles locales y fertilización química en la producción de plántula de chile poblano. Revista Fitotecnia Mexicana 43 (1): 35-44. https://doi.org/10.35196/rfm.2020.1.35.

De la Rosa, L.A., Alvarez-Parrilla, E. & Shahidi, F. (2011) Phenolic compounds and antioxidant activity of kernels and shells of Mexican pecan (*Carya illinoinensis*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 59: 152-62. https://doi.org/10.1021/jf1034306.

Flores-Córdova, M.A. & Sánchez-Chávez, E. (2016). Fitoquímicos y nutrientes en almendra y cáscara de nuez pecanera. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica.* RIIIT 3 (18): 1-10.

Han, H., Wang, S., Rakita, M., Wang, Y., Han, Q. & Xu, Q. (2018). Effect of Ultrasound-Assisted Extraction of Phenolic Compounds on the Characteristics of Walnut Shells. *Food and Nutrition Sciences,* 9(12). https://doi.org/10.4236/FNS.2018.9812.

Hernández-Rodríguez, A., Robles-Hernández, L., Ojeda-Barrios, D., Prieto-Luévano, J., González-Franco, A.C. & Guerrero-Prieto, V. (2017). Semicompost and vermicompost mixed with turba enhance seed germination and development of lettuce and tomato seedlings. *Interciencia,* 42 (11): 774-779. En: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33953499012.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera SIAP. (2024). Cierre de la producción agrícola por estado. Producción total de nuez pecanera en México. https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119.

Trevizol F., D. M. Benvegnú, C. S. Barcelos, C. S. Pase, H. Segat, D. Tironi, G. S. Dolci, N. Boufleur, P. Reckziegel and M. E. Burger (2011). Comparative study between two animal models of extrapyramidal movement disorders: Prevention and reversion by pecan. Behavioural Brain Research 221 (1): 13-8. https://doi.org/10.1016/j.bbr.2011.02.026.

Zucconi, F., Pera, A., Forte, M. & De Bertoli, M. (1981). Evaluating toxicity in immature compost. *Biocycle, 22*, 54–57.

INTEGRATION OF PROCESS-BASED MODELS, MACHINE LEARNING AND MANAGED FOREST CHRONOSEQUENCE ON SOIL CARBON ESTIMATIONS

Zaira Rosario Pérez Vázquez[1]; Gregorio Ángeles Pérez[2]; Bruno Chávez Vergara[3,4]; Martha Elva Ramírez Guzmán[5]; René Valdez Lazalde[2]; Valentín Reyes Hernández[2]

[1] Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. Subdirección de Investigación y Ciencia de Datos Ambientales. Ciudad de México, 03200.
[2] Colegio de Postgraduados, Postgrado en Ciencias Forestales, Montecillo, Edo. de México, 56264, México.
[3] Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Departamento de Ciencias Ambientales y del Suelo, Ciudad de México, 04510.
[4] Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía. Ciudad de México, 04510.
[5] Colegio de Postgraduados, Postgrado en Estadística, Montecillo, Estado de México, 56264.

Correo del autor de correspondencia: zaira.perez@profepa.gob.mx

ABSTRACT

Soil C dynamics emerge from coupled processes in the forest floor (FF) and topsoil, modulating nutrient cycling and soil fertility. Assessing these dynamics in managed landscapes is challenging due to spatiotemporal variability and recurrent silvicultural interventions. We used an approach that integrates machine learning and process-based modeling to quantify and map soil carbon in a temperate managed forest in central Mexico. We assembled a 2013–2023 dataset comprising forest inventories, LiDAR metrics, hemispherical photographs, and records from an eddy-covariance tower. We mapped C and N stocks and C/N ratios in two FF layers —litter (L) and fermentation-humus (FH). Predictive performance was high after applying a rigorous optimization framework (R^2 = 0.88–0.96). Dominant drivers of spatiotemporal patterns included FF decomposition stage, stand age, basal area, and elevation. Chronosequence analysis revealed contrasting functions of FF layers: FH acts as a longer-term reservoir, whereas L is transitory. At the landscape scale, current management practices have maintained FF C and N stocks comparable to unmanaged conditions. In topsoil, we parameterized the Rothamsted Carbon Model (RothC) for managed (7, 18, 30 years) and unmanaged (80 years) stands. Simulations indicated age-dependent SOC trajectories: the youngest managed stand exhibited SOC gains, the older managed stand experienced SOC declines, and the unmanaged stand sustained long-term SOC accumulation. Soil moisture availability emerged as a key regulator of SOM decomposition. By integrating spatial hybrid modeling with long-term simulations, this study refines SOC estimates and supports resilient forest management decisions applicable to environmental assessment, restoration, environmental compensation, and monitoring design.

KEYWORDS: F*orest management; random forest; RothC; spatiotemporal dynamics; soil digital mapping.*

INTRODUCTION

The forest floor–topsoil (FF–topsoil) continuum underpins forest ecosystem functioning by linking aboveground vegetation with belowground processes (Larson *et al.,* 2024). Organic inputs—litter, fine roots, rhizodeposits, and faunal detritus—sustain microbial communities that, via extracellular enzymes, transform complex substrates, recycle nutrients, and produce microbial residues that interact with minerals to stabilize soil organic matter (SOM) (Rocci *et al.,* 2024). The balance between C inputs and losses through decomposition, leaching, and erosion governs soil organic carbon (SOC), with direct implications for soil fertility and productivity (Mayer *et al.,* 2020). SOC storage across the FF–topsoil continuum is shaped by biotic and abiotic controls and by natural and anthropogenic disturbances; forest management can either exacerbate short-term losses or promote recovery, depending on silvicultural intensity and practice (Wiesmeier *et al.,* 2019). Given the limitations of field sampling and remote sensing to capture belowground variability at landscape scale, integrated approaches are required. Digital Soil Mapping with machine learning (ML)—specifically Random Forest (RF)—enables spatial prediction of FF and mineral soil properties, while process-based models such as RothC provide a mechanistic representation of long-term SOM decomposition and turnover (McBratney *et al.,* 2003; Coleman *et al.,* 1997). This study integrates RF and RothC to map C, N, and C/N in FF–topsoil to simulate SOC dynamics along managed and unmanaged chronosequences, thus refining soil-C accounting and informing sustainable forest management and monitoring.

MATERIALS AND METHODS

Study area. This research was conducted at the Atopixco Intensive Carbon Monitoring Site (SMIC-Atopixco), established in 2013 in Zacualtipán, Hidalgo, México (20°34'51'' - 20°40'17'' N and 98°34'22'' - 98°40'17'' W). The site covers 900 ha of temperate managed forest and includes a chronosequence of even-aged *Pinus patula* stands, ranging from 0 to 40 years, which occupy 70% of the area. The remaining 30% consists of old-growth pine-oak and montane cloud forests that have remained without active management for over 95 years. SMIC-Atopixco is part of the Mexican Network of Intensive Carbon Monitoring Sites (Ángeles-Pérez *et al.,* 2015) and the MexFlux network (Vargas *et al.,* 2013).

Sampling design. The SMIC-Atopixco is structured as a 3×3 km polygon subdivided into nine 1×1 km quadrants. At the center of this grid, an Eddy Covariance flux tower continuously measured ecosystem-level C exchange. A total of 41 permanent sampling plots (PSPs) were established since 2013, each covering a 1 ha area and containing four secondary sampling plots of 400 m^2 arranged in an inverted Y-shape, following the guidelines of the National Forest and Soil Inventory (INFyS; CONAFOR, 2012). The spatial arrangement of the PSPs was designed systematically across the chronosequences, aligned with sampling schemes used at U.S. carbon monitoring sites (Ángeles-Pérez *et al.,* 2015).

Data acquisition. a) *Litterfall.* Monthly litterfall was collected from 2013 to 2022 using 204 traps (0.5 m²) installed across 17 PSPs. The material was sorted into needles, broadleaves, twigs, and unidentified fractions, oven-dried at 70 °C, and weighted to estimate biomass inputs (Mg (megagrams) ha^{-1}) (Ángeles-Pérez *et al.*, 2015). b) *Forest floor.* Sampling was performed in Nov-Dec of 2013, 2018, and 2023, distinguishing the L (Oi; fresh litter) and FH (Oe+Oa; fermentation and humus) layers. A total of 984 samples per layer and sampling period were collected using a 0.25 m² PVC frame. In the laboratory, C (Mg ha-1) and N (kg ha^{-1}) stocks were determined following the protocols described by Pérez-Vázquez (2025) for the study area. c) *Fine root turnover*. Fine root (< 2 mm) was quantified in 2013 using ingrowth cores in managed (7, 18, 30 yr) and unmanaged (~80 yr) stands (Ángeles-Pérez *et al.*, 2015). d) *Soil organic carbon (SOC) and total N.* They were determined in 2013, 2018, 2023. SOC concentration was determined via coulometric detection of CO2 released during thermal oxidation at 950 °C in an oxygen-rich environment (Tiessen *et al.*, 1981). Total N concentration was determined by Kjeldahl method (McKenzie, 1994). e) E*nvironmental predictors.* Fourteen variables (1 m resolution) were compiled for 2013, 2018, 2023. Geographic (latitude, longitude); topographic (elevation, slope, aspect); stand/canopy (age, dominant height, basal area, canopy cover, gap fraction); diversity (richness, Shannon); management condition (binary); FF layer (L, FH).

Random Forest and RothC modeling. a) *Targets and predictors:* Three FF properties—C and N stocks and C/N ratio—were modeled for L and FH layers in 2013–2014, 2018, 2023, using 14 environmental predictors Categorical predictors (MCOND, FFLAYER) were binary-encoded as 0 and 1. Continuous predictors were screened for collinearity, and excluded when variable inflation factor (VIF > 5) and Spearman's correlation ($r^2 > 0.7$) indicated redundancy. b) *Random Forest (RF):* Two RF models were trained independently for each year. Baseline models (RF_0), which used default hyperparameter values, were contrasted with optimized models (RF_1), tuned through grid search with repeated K-fold cross-validation (K=10, 25 repeats). Model performance was assessed using R^2 and RMSE. d) *Process-based modeling (RothC):* Topsoil SOC (FF & 0–30 cm) was simulated for managed stands (7, 18, 30 yr) and one unmanaged (80 yr) stand using the RothC decomposition model (Coleman *et al.*, 1997). Monthly drivers included temperature, precipitation, evapotranspiration, and clay content, while litter inputs comprised litterfall and fine-root turnover. Residues were partitioned among RothC pools, with inert organic matter (IOM) estimated by pedotransfer function (Falloon, 2001). *f) Model integration.* RF-RothC maps provided spatially explicit FF C and N (and C/N) used to (a) interpret dominant controls and hotspots, and (b) harmonize mass and quality of residues informing RothC inputs by stand class, ensuring unit consistency and area-of-support alignment across methods.

RESULTS AND DISCUSSION

Modeling insights. The integration of spatiotemporal ML modeling and process-based simulations (RF–RothC) provided a coherent understanding of the forest floor (FF)–mineral topsoil continuum and its response to forest management. The RF–RothC models

showed consistently high predictive performance ($R^2 \approx 0.88–0.96$) for FF–topsoil C, N, and C/N, with stand age (AGE), basal area (BA), and FF layer (FFLAYER) emerging as dominant predictors. Explicitly distinguishing L (transient) from FH (more stable) horizons improved interpretability and the robustness of spatial predictions.

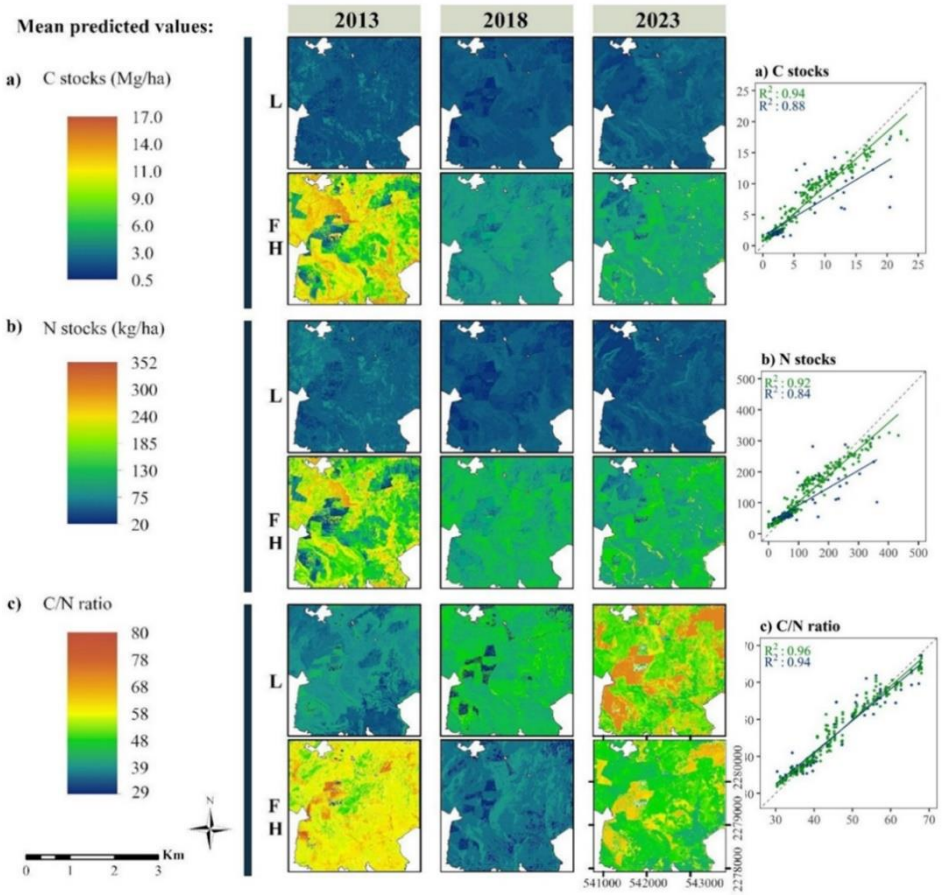


Figure 1. Spatial predictions (maps) of the FF–topsoil continuum, including observed versus predicted values from optimized RF–RothC models. Model performance is displayed for training (green) and test (blue) datasets. The dashed line represents the 1:1 correspondence, while the solid line shows the regression fit between observed and predicted values.

Spatiotemporal analyses for 2013–2018–2023 revealed that current management practices maintain FF C and N stocks at landscape scale comparable to unmanaged forests. However, trajectories varied by stand age: younger managed stands recovered more rapidly, while mature (~30 yr) and old unmanaged (~80 yr) stands exhibited persistent declines. The C/N ratio reflected shifts in decomposition and nutrient cycling, providing an additional indicator of FF stability. Hotspots of C and N loss or accumulation (Figure 1) highlighted focal areas for adaptive management. Topographic effects were secondary overall, but their influence increased over time, particularly following disturbance events.

Management implications. Model outputs suggest the following strategies: (i) extending rotations and retaining harvest residues can mitigate FF depletion; (ii) minimizing disturbance through low-compaction and low-impact harvesting reduces short-term C and N losses; and (iii) targeted species selection or retention can enhance inputs and improve system resilience.

Limitations and future directions. Five-year intervals may obscure seasonal dynamics; higher-frequency monitoring would strengthen model validation. In RothC simulations, assumptions regarding DPM/RPM partitioning and pool initialization could be refined through soil organic matter fractionation and decomposition assays. For spatial modeling, alternative algorithms such as GBM, SVM, neural networks, and geostatistical hybrids warrant exploration. Future work should also aim to spatialize RothC outputs, incorporate climate-change scenarios, and link microbial processes and residue chemistry to FF C/N dynamics to bridge mechanistic understanding with operational prediction.

CONCLUSIONS

This study advances understanding of SOM dynamics in conifer-dominated temperate managed forests, underscoring the central role of the FF in C retention and turnover. By integrating empirical observations, ML, and process-based modeling, we developed a robust framework to quantify and predict spatiotemporal variability. Results show that while current management can sustain FF nutrient levels comparable to unmanaged areas, targeted interventions are necessary to mitigate chronic nutrient losses and maintain long-term soil fertility. The distinct functions of L (transient) and FH (stable) layers, the influence of stand age, vegetation, and topography, and the importance of multiple organic inputs (litterfall, fine roots, FF) all shape SOC trajectories. Collectively, this work provides a scientific foundation to balance timber production, nutrient cycling, and carbon sequestration, while emphasizing the value of advancing spatial and process-based modeling for decision-making under environmental change.

BIBLIOGRAPHY

Ángeles-Pérez, G., Méndez-López, B., Valdez-Lazalde, J.R., Plascencia-Escalante, F O., de los Santos-Posadas, H.M., Chávez-Aguilar, G., Soriano-Luna, M. de los Á., Zaragoza-Castañeda, Z., Ventura-Palomeque, E., Martínez-López, A., Wayson, C., Olguín-Álvarez, M., Carrillo-Negrete, O. & Maldonado-Montero, V. (2015). *Estudio de caso del Sitio de Monitoreo Intensivo de Carbono en Hidalgo* (p. 105). Colegio de Postgraduados.

Coleman, K., Jenkinson, D.S., Crocker, G.J., Grace, P.R., Klír, J., Körschens, M., Poulton, P.R. & Richter, D. D. (1997). Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using RothC-26.3. *Geoderma*, *81*(1-2), 29-44. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00079-7.

CONAFOR. (2012). Manual y procedimientos para el muestreo de campo. Inventario Nacional Forestal y de Suelos.

Falloon, P.D. (2001). Large scale spatial modelling of soil organic carbon dynamics [PhD Thesis]. The University of Nottingham.

Larson, J., Kuglerová, L., Högberg, P. & Laudon, H. (2024). Variability in soil carbon-to-nitrogen ratios explained by environmental conditions in a boreal catchment. *Forest Ecology and Management*, *568*, 122108. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122108.

Mayer, M., Prescott, C.E., Abaker, W.E.A., Augusto, L., Cécillon, L., Ferreira, G.W.D., James, J., Jandl, R., Katzensteiner, K., Laclau, J.P., Laganière, J., Nouvellon, Y., Paré, D., Stanturf, J. A., Vanguelova, E. I. & Vesterdal, L. (2020). Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management*, *466*, 118127. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127.

McBratney, A. B., Santos, M.L.M. & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, *117*(1), 3-52. https://doi.org/10.1016/s0016-7061(03)00223-4.

Pérez-Vázquez, Z. R. (2025). *A multi-framework approach for modeling soil carbon dynamics in managed forests. Stock estimations and future projections* [PhD Thesis]. Colegio de Postgraduados.

Rocci, K. S., Cotrufo, M. F., Ernakovich, J., Foster, E., Frey, S., Georgiou, K., Grandy, A. S., Malhotra, A., Reich, P. B., Schlerman, E. P. & Wieder, W. R. (2024). Bridging 20 years of soil organic matter frameworks: Empirical support, model representation, and next steps. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, *129*(6), e2023JG007964. https://doi.org/10.1029/2023JG007964.

Tiessen, H., Bettany, J. R. & Stewart, J. W. B. (1981). An improved method for the determination of carbon in soils and soil extracts by dry combustion. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *12*(3), 211-218. https://doi.org/10.1080/00103628109367142.

Vargas, R., Paz, F. & De Jong, B. (2013). Quantification of forest degradation and belowground carbon dynamics: Ongoing challenges for monitoring, reporting and verification activities for REDD+. *Carbon Management*, *4*(6), 579-582. https://doi.org/10.4155/cmt.13.63.

Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobley, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H.-J. & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils—A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, *333*, 149-162. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026.

CORRELACIONES AMBIENTALES Y APLICACIONES DE LA TST EN EL TRÓPICO SECO DEL NORTE DE MÉXICO

Armando López Santos[1]; Susana Alejandra Mejía Romero[1]; Jorge Alejandro Torres González[2]

[1] Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Carretera Gómez Palacio - Ciudad Juárez, Bermejillo, 35230 km 40, Dgo.
[2] Centro de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Aguascalientes, Avenida Universidad 940, Ciudad Universitaria, Universidad Autónoma de Aguascalientes, 20100 Aguascalientes, Ags., México.

Correo del autor de correspondencia: alopez@chapingo.uruza.edu.mx

RESUMEN

La zonificación climática basada en TST (Temperatura Superficial Terrestre) es esencial para identificar áreas adversas en el trópico seco del norte de México, donde las olas de calor son frecuentes. El estudio utiliza teledetección y datos LANDSAT para correlacionar TST con variables ambientales, delimitando la Región Lagunera y clasificando patrones térmicos. Los resultados destacan la utilidad de la TST para detectar zonas de estrés ambiental y su correspondencia con datos meteorológicos. Se concluye que la integración de TST y espectros LANDSAT mejora la gestión del riesgo ambiental y la planificación territorial en regiones áridas.

PALABRAS CLAVE: *Islas de calor, zonificación, teledetección, zonas áridas*

INTRODUCCIÓN

El enfoque de Islas de Calor (IC), tradicionalmente empleado en entornos urbanos para fines de salud pública, ha demostrado ser útil también en áreas no urbanizadas, haciendo posible la zonificación climática local mediante herramientas de teledetección (Žgela *et al.,* 2024). La TST, obtenida por sensores satelitales como LANDSAT, permite detectar regiones sometidas a estrés ambiental; factores como la escasez de vegetación, precipitación, radiación y características del suelo pueden influir significativamente en la TST observada (Wan *et al.,* 2020).

En el árido norte de México, donde reside una parte considerable de la población nacional, el análisis de la TST cobra especial relevancia debido a la frecuencia e intensidad de las ondas de calor, especialmente durante los meses más cálidos. Herramientas como el Sistema de Alerta Temprana y mapas de riesgo derivados de puntos de calor han sido clave en la prevención de incendios forestales. No obstante, los estudios basados en TST y puntos de calor en México suelen enfocarse en áreas urbanas y existen limitaciones técnicas relacionadas con la estimación precisa de variables como NDVI y emisividad superficial, lo que puede afectar la fiabilidad de los resultados (Álvarez-Hernández *et al.,* 2023).

Considerando estos elementos, el objetivo de la presente investigación fue analizar la distribución espacial y temporal de la TST y su relación con los índices espectrales de LANDSAT, para zonificar áreas adversas para la vida humana. Se parte de la premisa de que la TST tiene correlación significativa con la temperatura ambiente registrada por estaciones meteorológicas convencionales y con variables ambientales asociadas al suelo y la vegetación.

MATERIALES Y MÉTODOS

La unidad de estudio cubrió el 42.6% (42,727 km²) de la Región Lagunera, localizada en el centro-norte de México, con una altitud media de 1,139 msnm. Incluye 12 de los 15 municipios, distribuidos en Coahuila y Durango. Para la evaluación de TST se emplearon diversos insumos como los conjuntos vectoriales en formato *shp* del INEGI (2018a) en escala 1:250,000, por ejemplo, los que integran la Región Lagunera (RL). Además, se incorporaron datos de uso de suelo y vegetación (USV), basados en la serie VII y la misma escala (INEGI, 2018b), para caracterizar las coberturas terrestres presentes en la región de estudio. Ambos insumos, tanto los límites municipales como la información actualizada de uso de suelo y vegetación, resultaron fundamentales para delimitar el área de análisis y contextualizar los patrones observados en la TST. Para calcular TST, se usaron las bandas térmicas de LANDSAT, ajustadas según el área de estudio. El valor de la TST en grados Celsius se obtiene con la fórmula:

$$TST = [(Qcal \times VCa) + VCo] - 273.15$$

donde Qcal corresponde a los valores digitales de la imagen; VCa (0.00341802) y VCo (149) son constantes contenidas en los metadatos LANDSAT, y 273.15 es para convertir de Kelvin a Celsius. Se establecieron seis clases (C) en rangos TST en °C como se indica a continuación: C1: ≤8; C2: 8-20; C3: 20-32; C4: 32-44; C5: 44-56; y C6: > 56. Esta clasificación permitió una interpretativa espacial de los patrones térmicos y sus implicaciones ecológicas en el paisaje estudiado. Para el análisis, se aplicó un enfoque geoestadístico en QGIS, procesando las imágenes de TST mes a mes durante los dos años evaluados. A partir del análisis de frecuencias, se determinaron tanto la temperatura media (Tmed) como la máxima (Tmax). La zonificación mensual de temperaturas se realizó incrementando intervalos de 5 °C, lo que permitió segmentar cada imagen en las seis clases térmicas previamente definidas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis espacial de la unidad de estudio reveló que los rangos de TST predominantes en ambos periodos fueron de 20–32, 32–44 y 44–56 °C. Es importante destacar que durante junio y julio de 2017 se registró la mayor extensión de superficie con temperaturas superiores a 56 °C, siendo estos meses los que presentaron los valores máximos de TST. Las temperaturas entre 44 y 56 °C se observaron principalmente de abril a septiembre. En términos generales, la mayor parte del territorio se mantuvo en el rango de 20–32 °C, seguido por la categoría de 44–56 °C (Cuadro 1). Las TST más elevadas y persistentes a lo largo de nueve meses se ubicaron en los municipios de Tlahualilo, San

Pedro, Francisco I. Madero, Viesca y Matamoros, situados al este de la unidad de estudio. Cabe resaltar que la mayor extensión de áreas con temperaturas altas ocurrió en 2017, específicamente en los meses de junio y julio. En las zonas áridas, es frecuente observar temperaturas muy altas, lo que se debe principalmente a factores ambientales como la escasez de agua, la intensa radiación solar y la limitada cobertura vegetal (Tariq *et al*., 2020; Aboelnour y Engel, 2018; Gohain, Mohammad y Goswami, 2021). Además, el uso que se le da a la tierra influye en el aumento térmico: ya sea en terrenos agrícolas, áreas no cultivables, pastizales destinados a la ganadería o zonas urbanas, la actividad humana suele ser el factor principal detrás de estas elevadas temperaturas (Gohain, Mohammad y Goswami, 2021).

Cuadro 1. Superficie en km² por rango de TST (°C) por escena representativa para cada mes en 2017 y 2021.

		Rangos de temperatura en °C					
Año	**Mes**	**≤ 8**	**8 - 20**	**20 - 32**	**32 - 44**	**44 - 56**	**≥ 56**
2017	Ene	0.0 (0%)	637.1 (3.7%)	16133.4 (93.7%)	447.7 (2.6%)	0.0 (0%)	0.0 (0%)
	Feb	17.2 (0.1%)	757.6 (4.4%)	15169.1 (88.1%)	1274.1 (7.4%)	0.0 (0%)	0.0 (0%)
	Abr	0.0 (0%)	0.0 (0%)	189.4 (1.1%)	3701.9 (21.5%)	13275.2 (77.1%)	51.7 (0.3%)
	May	0.0 (0%)	0.0 (0%)	34.4 (0.2%)	1842.3 (10.7%)	15014.2 (87.2%)	327.1 (1.9%)
	Jun	0.0 (0%)	0.0 (0%)	3.4 (0.02%)	1050.3 (6.1%)	6801.1 (39.5%)	9366.6 (54.4%)
	Jul	103.3 (0.6%)	292.7 (1.7%)	464.9 (2.7%)	2221.1 (12.9%)	7093.9 (41.2%)	7042.2 (40.9%)
	Sep	51.7 (0.3%)	86.1 (0.5%)	275.5 (1.6%)	2892.6 (16.8%)	12362.6 (71.8%)	1549.6 (9%)
	Oct	0.0 (0%)	6.9 (0.04%)	1773.5 (10.3%)	14618.2 (84.9%)	809.3 (4.7%)	0.0 (0%)
	Nov	0.0 (0%)	361.6 (2.1%)	15393.0 (89.4%)	1463.5 (8.5%)	0.0 (0%)	0.0 (0%)
2021	Ene	5.2 (0.03%)	2703.2 (15.7%)	14514.9 (84.3%)	0.2 (0.0001%)	0.0 (0%)	0.0 (0%)
	Feb	5.2 (0.03%)	1635.7 (9.5%)	15513.5 (90.1%)	51.7 (0.3%)	0.0 (0%)	0.0 (0%)
	Abr	1.7 (0.01%)	5.2 (0.03%)	275.5 (1.6%)	5027.7 (29.2%)	11914.9 (69.2%)	0.2 (0.001%)
	May	0.0 (0%)	0.0 (0%)	1.7 (0.01%)	1084.7 (6.3%)	13757.3 (79.9%)	2376.1 (13.8%)
	Jun	964.2 (5.6%)	9401.1 (54.6%)	6852.8 (39.8%)	0.0 (0%)	0.0 (0%)	0.0 (0%)
	Jul	1.7 (0.01%)	6.9 (0.04%)	86.1 (0.5%)	3271.4 (19%)	12569.2 (73%)	1274.1 (7.4%)
	Sep	17.2 (0.1%)	172.2 (1%)	843.7 (4.9%)	8058.1 (46.8%)	8109.7 (47.1%)	0.0 (0%)
	Oct	34.4 (0.2%)	2995.9 (17.4%)	14187.7 (82.4%)	0.7 (0.004%)	0.0 (0%)	0.0 (0%)

Nov	0.0 (0%)	51.7 (0.3%)	3736.3 (21.7%)	13430.1 (78%)	0.0 (0%)	0.0 (0%)

CONCLUSIONES

En ambos años, se observó que las temperaturas superficiales más altas se presentaron al este de la unidad de estudio, siendo mayores en 2017. Asimismo, la correlación más significativa se obtuvo con los datos de emisividad, seguidos por la temperatura del aire y, por último, el índice NDVI, todos considerados como variables independientes. Por ende, se valida la hipótesis inicial, dado que los tres factores analizados mostraron resultados favorables durante la mayor parte del año.

BIBLIOGRAFÍA

Aboelnour, M. & Engel, B. A. (2018). Application of remote sensing techniques and geographic information systems to analyze land surface temperature in response to land use/land cover change in Greater Cairo Region, Egypt. *Journal of Geographic Information System*, 10(1), 57-88. 10.4236/jgis.2018.101003.

Álvarez-Hernández, G., Yera-Grillo, D., Robles-Morúa, A., Navarro-Estupiñan, J., Reyes-Castro, P.A., Encinas-Cárdenas, A.A., Duarte-Tagles, H.F. & Candia-Plata, M.D. (2023). Spatial correlation of dengue with socioeconomic status and land temperature in northwest Mexico. Biotecnia. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v26i1.2175.

Gohain, K. J., Mohammad, P. & Goswami, A. (2021). Assessing the impact of land use land cover changes on land surface temperature over Pune city, India. *Quaternary International*, 575, 259-269. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.052.

INEGI (2018a). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional [Formato vectorial, Shapefile]. https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781.

INEGI (2018b). División política municipal [Formato vectorial, Shapefile], 1:250000. Aguascalientes, México. http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/muni_2018gw.html.

Tariq, A., Riaz, I., Ahmad, Z., Yang, B., Amin, M., Kausar, R., Andleeb, S., Farooqi, M.A. & Rafiq, M. (2020). Land surface temperature relation with normalized satellite indices for the estimation of spatio-temporal trends in temperature among various land use land cover classes of an arid Potohar region using Landsat data. *Environmental Earth Sciences*, 79, 1-15. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8766-2.

Wan Mohd Jaafar, W.S., Abdul Maulud, K.N., Muhmad Kamarulzaman, A.M., Raihan, A., Md Sah, S., Ahmad, A., Saad, S.N.M., Mohd Azmi, A.T., Jusoh Syukri, N.K.A. & Razzaq Khan, W. (2020) The Influence of Deforestation on Land Surface Temperature—A Case Study of Perak and Kedah, Malaysia. *Forests*, 11, 670. https://doi.org/10.3390/f11060670.

Žgela, M., Herceg-Bulić, I., Lozuk, J. & Jureša, P. (2024). Linking land surface temperature and local climate zones in nine Croatian cities. *Urban Climate*, *54*, 101842. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101842.

COMPOSICIÓN IÓNICA Y CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE LAS AGUAS DEL LAGO CRÁTER ATEXCAC, PUEBLA

Judith Bandala Aguilar[1]; Héctor Manuel Ortega Escobar[1]; Juan Uriel Avelar Roblero[2]; Oscar Raúl Mancilla Villa[3]; Álvaro Can Chulim[4].

[1] Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, carretera México-Texcoco Km. 35.5, Montecillo, Texcoco C.P. 56230, Estado de México, México.
[2] Universidad Autónoma Chapingo, carretera México-Texcoco Km. 38.5, Chapingo, Texcoco C.P. 56230, Estado de México, México.
[3] Universidad de Guadalajara. CUCSUR, Av. Independencia Nacional #151 C.P. 48900, Autlán, Jalisco, México.
[4] Universidad Autónoma de Nayarit. Unidad Académica de Agricultura. Carretera Tepic-Compostela km 9.63780 Xalisco, Nayarit, México.

Correo del autor de correspondencia: bandala.judith@colpos.mx

RESUMEN

El lago cráter Atexcac, localizado en el Eje Neovolcánico Transversal de México, constituye un sistema acuático hipersalino de relevancia geoquímica e hidrogeológica, debido a los complejos procesos de interacción entre el suelo y el flujo subterráneo. El objetivo de este estudio fue caracterizar la composición iónica, la fuerza iónica y la presión osmótica de las aguas del lago Atexcac, y analizar su relación con la conductividad eléctrica y otros parámetros fisicoquímicos. Se recolectaron muestras de agua durante el periodo de diciembre de 2024 a marzo de 2025, determinando concentraciones de cationes y aniones principales mediante técnicas estándar, y calculando la fuerza iónica y la presión osmótica a partir de los datos obtenidos. En las cercanías perimetrales del lago Atexcac se tienen zonas agrícolas importantes que se riegan con pozos de alguna profundidad por lo que es evidente que se tenga una intercomunicación entre espesores de suelos saturados debido a la transmisibilidad. Los resultados muestran una correlación lineal entre la conductividad eléctrica, la fuerza iónica y la presión osmótica. En conclusión, el lago Atexcac es un sistema químicamente extremo donde la fuerza iónica y la presión osmótica juegan un papel central en la estructura y funcionamiento del ecosistema, siendo parámetros clave para entender su dinámica y conservación.

PALABRAS CLAVE: *Axalapasco; hidroquímica; sales hipotéticas; geoquímica.*

INTRODUCCIÓN

Los lagos cráter, también conocidos como maars, son cuerpos de agua formados en depresiones volcánicas generadas por erupciones explosivas o procesos freatomagmáticos. La dinámica hidroquímica de los lagos cráter en la Cuenca Oriental de México, como el lago Atexcac, está profundamente influenciada por la interacción entre los materiales volcánicos circundantes y el agua subterránea. Diversos estudios han demostrado que los suelos de origen volcánico, caracterizados por una alta permeabilidad y textura gruesa, facilitan la infiltración y el flujo de agua, lo que a su vez

condiciona la composición química de los acuíferos y cuerpos lacustres de la región (Can-Chulim *et al.,* 2011). Esta permeabilidad no solo permite la recarga eficiente de los sistemas acuáticos, sino que también promueve la liberación y el transporte de iones y nutrientes esenciales para el equilibrio ecológico del lago; indicando al mismo tiempo que los pozos agrícolas que circundan el perímetro de este lago cráter estarían en intercomunicación debido a la transmisibilidad de los diferentes espesores saturados.

Por otra parte, investigaciones sobre la hidroquímica y las microbialitas en lagos alcalinos como Alchichica han evidenciado la importancia de la interacción entre el agua y los materiales volcánicos en la formación de estructuras biogénicas y en la evolución de la calidad del agua (Kazmierczak et al., 2011). Comprender estos procesos es fundamental para evaluar la sostenibilidad y la conservación de los ecosistemas lacustres en ambientes volcánicos, donde la permeabilidad del suelo juega un papel determinante en la dinámica ambiental y en la disponibilidad de recursos hídricos.

La composición iónica de los lagos cráter es un indicador clave de los procesos hidroquímicos que ocurren en estos sistemas. Estudios recientes han documentado cómo factores como la interacción con materiales volcánicos, la evaporación y la precipitación influyen en la concentración de aniones y cationes en las aguas de estos lagos (Radke *et al*., 2003; Santoyo de la Cruz *et al*., 2022). Sin embargo, en México, la investigación sobre lagos cráter es aún limitada, lo que acentúa la necesidad de estudios detallados que contribuyan al conocimiento de su dinámica hidrogeoquímica.

El lago cráter Atexcac, es un sistema singular que combina características geológicas y climáticas distintivas. Este lago, conocido localmente como Axalapasco, es uno de los seis maars de la región formados por explosiones freatomagmáticas durante el Cuaternario (Silva-Aguilera *et al*., 2010; Santoyo de la Cruz *et al*., 2022). La composición iónica de sus aguas está influenciada por la interacción con materiales volcánicos y procesos de evaporación, lo que lo convierte en un sitio ideal para estudiar la evolución geoquímica de soluciones salinas.

En particular, el lago Atexcac ha sido poco estudiado en comparación con otros lagos de la región, como Alchichica. Sin embargo, investigaciones previas han señalado que sus aguas presentan una composición iónica dominada por Na^+ y Cl^-, con variaciones significativas en SiO_2 y HCO_3^- (Mancilla-Villa *et al*., 2014).

MATERIALES Y MÉTODOS

El lago Atexcac se encuentra localizado en la Cuenca del Oriental, situada en los estados de Puebla, Tlaxcala y Veracruz en las coordenadas 97° 09′ y 98° 03′ de longitud oeste y a los 18° 48´ y 19° 43′ de latitud norte (Gasca, 1982); asimismo, se encuentra en los Llanos de San Juan (Mancilla-Villa *et al*., 2014). Las principales características morfométricas son: un área superficial de 0.29 km^2 con un volumen de 6.10 m^3x10^6, y 39.10 m de profundidad máxima (Arreondo *et al.,* 1983).

Se realizaron cuatro muestreos de aguas del lago cráter Atexcac, Puebla, de manera mensual, iniciando en diciembre de 2024 hasta marzo de 2025. Los iones se determinaron analíticamente utilizando los métodos APHA (1997): pH, CE, Ca^{2+}+, Mg^{2+}, Na^+ y K^+,

CO_3^{2-}, HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-} (métodos 4500-H^+B, 2510-B, 3500-Ca^{2+}D, 3500-Na^+K^+D, 2320-B, 4500-CIB, 4500-SO_4^{2-} E, 2540-D y 2540-E). Las sales hipotéticas se calcularon de acuerdo con lo reportado por Mendoza (2009).

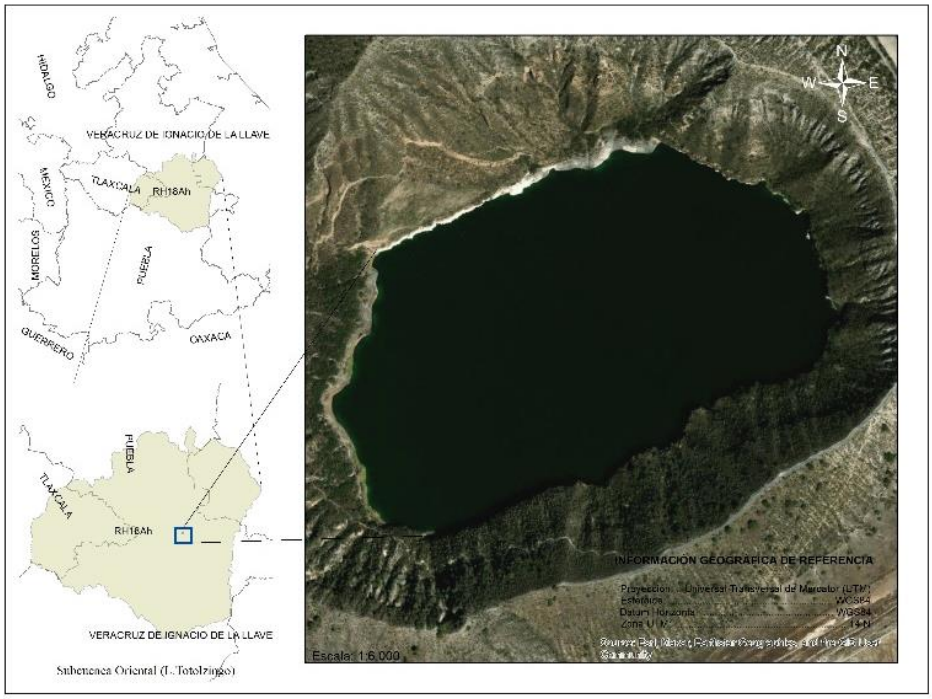


Figura 1. Mapa de ubicación geográfica del lago cráter Atexcac, Pue. Elaboración propia con datos cartográficos del INEGI, 2025.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estudios realizados muestran hallazgos clave sobre la composición iónica y los procesos hidroquímicos en el lago cráter Atexcac en la Cuenca del Oriental, México. La conductividad eléctrica (CE) es alta, con valores entre 14,000 y 15,325 µS cm^{-1}, indicando una salinidad considerablemente alta. El pH se mantiene en valores alcalinos (8.7-8.8), lo cual es característico de sistemas endorreicos volcánicos con predominancia de carbonatos y bicarbonatos.

La composición iónica dominante que presenta son altas concentraciones de iones Na^+ y Cl^- seguidos por HCO_3^- (Cuadro 1), lo que concuerda por lo reportado por Mancilla-Villa *et al.* (2014) y Santoyo de la Cruz *et al.* (2022), lo que indica procesos de evaporación intensa e interacción con rocas volcánicas.

La composición de NaCl y $MgCl_2$ como sales hipotéticas predominantes de las aguas del lago Atexcac (Cuadro 2) refleja su origen en un maar por explosiones freatomagmáticas durante el Cuaternario, donde el agua interactúa con basaltos y tobas ricas en sodio. Este patrón es comparable al de los lagos volcánicos como el Keli Mutu (Indonesia), aunque con menor alcalinidad debido a la ausencia de actividad hidrotermal reciente (Pasternack y Varekamp, 1994).

Los indicadores presión osmótica y la fuerza iónica están estrechamente relacionados, ya que ambas dependen de la cantidad y tipo de iones presentes en la solución. De acuerdo con Santoyo de la Cruz et al. (2022) a mayor concentración de iones, tanto la presión osmótica como la fuerza iónica aumentan, como se observa en los resultados del lago Atexcac.

La presión osmótica en el lago Atexcac varía entre 5.7 y 6.3 atm, mientras que la fuerza iónica oscila entre 0.172 y 0.182, valores significativamente altos en comparación con sistemas de agua dulce (Mancilla-Villa et al., 2014). La gráfica de fuerza iónica con la CE muestra, que al aumentar la concentración de iones la fuerza iónica también incrementa, de acuerdo con Mendoza (2009) implica una mayor interacción iónica y una reducción en la actividad de los iones libres.

La gráfica de presión osmótica con la CE revela que la presión osmótica crece de manera proporcional con la concentración de sales, según Radke *et al.* (2003) esta concentración incrementa el estrés osmótico para los organismos acuáticos y limita la biodiversidad a especies halotolerantes.

Cuadro 1. Composición iónica de las aguas del lago cráter Atexcac localizado en la cuenca del Oriental, Puebla.

Mes	pH	C.E.	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^{+}	K^{+}	Suma
		$\mu S\ cm^{-1}$	mmolc L^{-1}				
	8.8	15325	0.95	50	95.69	3.22	149.86
DIC, 2024			19.04	607.5	2200.87	125.9	
			0.48	25	95.69	3.22	
	8.7	14885	0.8	48.8	93.4	2.56	145.56
ENE, 2025			16.03	592.92	2148.2	100.1	
			0.4	24.4	93.4	2.56	
	8.7	14780	0.85	51.65	89.42	2.62	144.54
FEB, 2025			17.03	627.55	2056.66	102.44	
			0.43	25.83	89.42	2.62	
	8.7	14000	0.96	53.65	80.24	3.06	137.91
MAR, 2025			19.24	651.85	1845.52	119.65	
			0.48	26.83	80.24	3.06	

Mes	CO_3^{2-}	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Suma	% error	mg L^{-1}
	mmolc L^{-1}						mmol L^{-1}
	16.8	15.1	108.29	4.79	144.98	1.66	
DIC, 2024	504	921.1	3838.88	230.06			8447.35
	8.4	15.1	108.29	2.4			258.57
	14.2	17.2	104.6	4.82	140.82	1.66	
ENE, 2025	426	1049.2	3708.07	231.5			8272.02
	7.1	17.2	104.6	2.41			252.07
	14.2	17	101.74	7.86	140.8	1.31	
FEB, 2025	426	1037	3606.68	377.52			8250.88
	7.1	17	101.74	3.93			248.06
	13.8	18	93.97	7.14	132.91	1.85	
MAR, 2025	414	1098	3331.24	342.93			7822.42
	6.9	18	93.97	3.57			233.05

Cuadro 2. Composición de las sales hipotéticas de las aguas del lago cráter Atexcac localizado en la cuenca del Oriental, Pue.

Mes/Sal hipotética	Na_2CO_3	NaCl	$Ca(HCO_3)_2$	$KHCO_3$	$MgCl_2$	$Mg(HCO_3)_2$	$MgSO_4$	Suma
	meq*L							
DIC, 2024	16.80	78.89	0.95	3.21	29.40	10.93	4.79	144.97
ENE, 2025	14.20	79.20	0.80	2.56	25.40	13.84	4.82	140.82
FEB, 2025	14.20	75.22	0.85	2.62	26.52	13.53	7.86	140.80
MAR, 2025	13.80	66.44	0.96	3.06	27.53	13.98	7.14	132.91

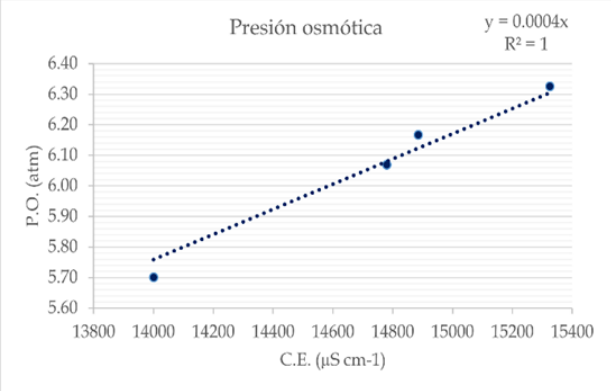


Figura 13. Presión osmótica.

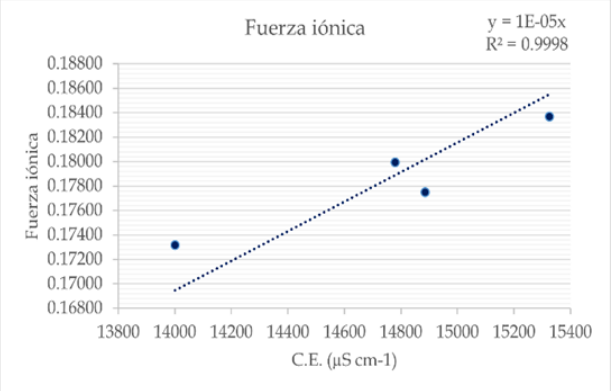


Figura 12. Fuerza iónica.

CONCLUSIONES

El estudio realizado sobre el lago Atexcac muestra que la salinidad de estas aguas es de alta concentración y que pude existir la posibilidad de que, debido a la transmisibilidad entre espesores saturados, las aguas de los pozos profundos aledaños aumenten su concentración. La velocidad de esa transmisibilidad dependerá de los sistemas porosos de los diferentes suelos y espesores litológicos.

Esta interrelación entre el suelo y las aguas subterráneas no solo asegura el abastecimiento hídrico, sino que también determina la calidad fisicoquímica del agua del lago. Estas, muestran una composición iónica dominada por Na^+ y Cl^-, alta CE y fuerza iónica, con una presión osmótica significativa, lo que lo clasifica como un sistema hipersalino. Además, existe una correlación directa entre fuerza iónica, presión osmótica y CE, reflejando la influencia conjunta de la evaporación y la geología local.

El conocimiento detallado de la transmisibilidad, la fuerza iónica y su impacto en la química y biología del lago es esencial para futuras investigaciones sobre evolución lacustre, conservación ecológica y manejo de recursos hídricos en ambientes volcánicos endorreicos.

BIBLIOGRAFÍA

APHA. American Public Health Association. (1997). Standard methods for the examination of water and wastewater. 17th ed. Port City Press. Baltimore, MD.

Arredondo, F.J., Borrego, R.L.C. & Valladolid, M. (1983). Batimetría y morfometría de los lagos "maars" de la Cuenca de Oriental, Puebla, México. *Biótica*, 8 (1): 31-47.

Can-Chulim, M. G., Alcocer, J., Escobar, E. & Oseguera, L. A. (2011). Permeabilidad y recarga de los lagos cráter en la Cuenca Oriental de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(1), 183-196.

Kazmierczak, J., Kempe, S., Kremer, B., López-García, P., Moreira, D. & Tavera, R. (2011). Hydrochemistry and microbialites of the alkaline crater lake Alchichica, Mexico. *Facies*, *57*(4), 543–570. https://doi.org/10.1007/s10347-010-0255-8

Gasca-Durán, A. (1982). Génesis de los lagos cráter de la Cuenca de Oriental. *Colec. Cient. Inst. Nal. Antropol. Hist.* 98 México. 45 pp.

Mancilla-Villa, O.R., Bautista-Olivas, A.L., Ortega-Escobar, H.M., Sánchez-Bernal, E.I., Can-Chulim, Á., Guevara-Gutiérrez, R. D., & Ortega-Mikolaev, Y.M. (2014). Hidrogeoquímica de salinas Zapotitlán y los lagos-cráter Alchichica y Atexcac, Puebla. *IDESIA (Chile)* 32(1): 55-69. https://doi.org/10.4067/S0718-34292014000100007.

Mendoza, S.I. (2009). Calidad de las aguas residuales urbano-industriales que riegan el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. Tesis de doctorado. Colegio de Postgraduados.

Pasternack, G. B. & Varekamp, J.C. (1994). The geochemistry of the Keli Mutu crater lakes, Flores, Indonesia. *Geochemical Journal* 28(3): 243-262. https://doi.org/10.2343/geochemj.28.243.

Radke, L. C., Juggins, S., Halse, S. A., De Deckker, P. & Finston, T. (2003). Chemical diversity in south-eastern Australian saline lakes II: Biotic implications. *Marine and Freshwater Research* 54(7): 895-912. https://doi.org/10.1071/MF03021

Santoyo de la Cruz, M.F., Ortega-Escobar, H.M., Mancilla-Villa, O.R., Ramírez-Ayala, C., Martínez-Villegas, E. & Sánchez Bernal, E. I. (2022). Análisis iónico de las aguas de seis lagos cráter de la Cuenca Oriental, México. *IDESIA (Chile)* 40(4): 7-15. https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000400007.

Silva-Aguilera, R.A., Vilaclara, G., Armienta, M.A., Escolero, Ó. (2022). Hidrogeología e Hidroquímica de la Cuenca Serdán-Oriental y del Lago Alchichica. En: Alcocer, J. (eds.) Limnología del Lago Alchichica. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79096-7_5.

DETERMINACIÓN DE MADUREZ DE VERMICOMPOSTA MEDIANTE CROMATOGRAFÍA CIRCULAR DE PFEIFFER

Lucia Socorro Gutiérrez González[1]; Ofelia Adriana Hernández Rodríguez[1]; Mayra Arteaga-Barrueta[2]; Dámaris Leopoldina Ojeda Barrios[1]; Graciela Dolores Ávila Quezada[1]; Andrés Francisco Martínez Rosales[3]

[1] Facultad de Ciencias Agrotecnológicas, Universidad Autónoma de Chihuahua. Avenida Universidad y Avenida Pascual Orozco s/n, 31110, Chihuahua, Chih., México.
[2] Facultad de Agronomía, Universidad Agraria de la Habana, Carretera Tapaste y Autopista Nacional Km 23 1/2, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba. CP:32700.
[3] Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Zootecnia y Ecología, Francisco R. Almada, 31453, Chihuahua, Chih., México.

Correo del autor de correspondencia: aernande@uach.mx

RESUMEN

La cromatografía en papel circular de Pfeiffer es una técnica cualitativa que refleja el grado de transformación y humificación de los abonos orgánicos. El objetivo fue establecer la relación entre los componentes de los cromatogramas de Pfeiffer y parámetros convencionales que indican la madurez de la vermicomposta. Una mezcla de estiércol vacuno y aserrín de pino se sometió a vermicompostaje y se relacionaron los resultados de los componentes de los cromatogramas de Pfeiffer con los de pH, nitrógeno total, carbono orgánico total y relación C/N, mediante análisis de correlación y regresión lineal múltiple. Desde el día 127, los parámetros químicos indicaron que los residuos alcanzaron niveles de madurez según la norma. El análisis de correlación y regresión lineal mostró que variables químicas como carbono orgánico, relación C/N, pH y nitrógeno total pueden estimarse a partir de ciertos componentes de los cromatogramas, especialmente del número de nubes, hoyos y radiales, y grosor de la zona central. Estos hallazgos aportan indicadores útiles en el uso del análisis cromatográfico de Pfeiffer como herramienta para evaluar la madurez de los abonos orgánicos.

PALABRAS CLAVE: *Croma, cromatograma, papel circular, vermicompostaje.*

INTRODUCCIÓN

Una alternativa para aprovechar los residuos orgánicos (RO) de la actividad primaria es someterlos a procesos de descomposición controlada, para su transformación en abonos orgánicos (AO), los cuales son reconocidos por su potencial para mejorar las características físicas, químicas y biológicas del suelo (Hernández-Rodríguez *et al*. 2021). El vermicompostaje es un proceso de bio-oxidación, degradación y estabilización de la MO presente en los RO, desarrollado por la interacción conjunta entre las lombrices de tierra y los microorganismos (Mupambwa y Mnkeni, 2018).

La madurez de los AO es uno de los parámetros más importantes para evaluar la calidad de estos. El grado de madurez se expresa como el estado de degradación, transformación y síntesis microbiana en que se encuentran los RO que han sido

degradados (Céspedes *et al*., 2014). Sin embargo, el análisis cuantitativo de los AO resulta ser una práctica costosa y poco asequible para el productor agrícola (Aguirre *et al*., 2019) además, estos procedimientos generan residuos químicos que pueden contaminar el medio ambiente (Ortega *et al*., 2023).

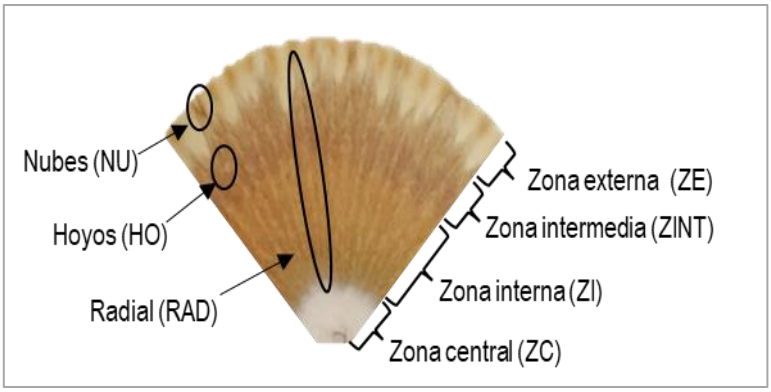


Figura 1. Componentes del cromatograma en papel circular de Pfeiffer: zona central, zona interna, zona intermedia, zona externa, nubes, hoyos y radiales (Restrepo y Pinheiro, 2011).

Existen diversos métodos para evaluar la calidad de los AO, uno de los más útiles es la cromatografía en papel circular de Pfeiffer (CCP) ya que permite monitorear su salud y desarrollo, además de reducir costos y tiempo (Arteaga-Barrueta *et al*., 2021). La CCP es una técnica analítica que ofrece una descripción general de la actividad biológica de los AO analizadas a través de una imagen, croma o cromatograma (Gordillo *et al*., 2011), basada en la descripción de su grosor, forma y colores revelados de sus componentes (Restrepo y Pinheiro, 2011) (Figura 1).

Sin embargo, la CCP tiene como desventaja la dificultad para realizar la interpretación de los cromas resultados de esta técnica. Por ello, es necesario seguir realizando más investigaciones sobre sus limitaciones y alcances (Burle y Figueiredo, 2019). Con base a lo anterior se estableció como objetivo del presente trabajo establecer la relación entre los componentes de los cromatogramas de Pfeiffer y parámetros convencionales que indican la madurez de la vermicomposta (VC).

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas de la Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México. En la producción de la VC se utilizó una mezcla de estiércol bovino de engorda como fuente de nitrógeno y aserrín de pino como fuente de carbono. Dicha mezcla se sometió a vermicompostaje con tres repeticiones, empleando contenedores plásticos con capacidad de 0.06 m^3 y orificios en el fondo de 0.5 cm de diámetro para el drenaje, el porcentaje de humedad se mantuvo entre 75 y 85%. Seis días después de establecido el experimento (DDE), se inocularon 10 lombrices adultas de la variedad roja californiana (*Eisenia fetida*) por cada litro de sustrato, (Sánchez-Rosales *et al.* 2019).

El estudio tuvo una duración de 183 días, en que se realizaron nueve muestreos a los 4, 35, 68, 98, 127, 141, 155, 169 y 183 DDE. Se recolectaron aproximadamente 500 g de muestra, se procedió a secarla a temperatura ambiente y posteriormente en estufa a 60° C. Las muestras se tamizaron en malla No. 20. Para el análisis convencional de los RO se cuantificaron por triplicado las variables: nitrógeno total (Nt) mediante el método Micro-

Kjeldahl, el carbono orgánico total (Cot) por digestión húmeda, pH con potenciómetro en una dilución en agua desionizada 1:5 (p/v).

Para el análisis integral mediante CCP, las muestras se analizaron de acuerdo con lo descrito por Restrepo y Pinheiro (2011). La valoración de los componentes de los cromas obtenidos se realizó visual y manualmente. Las dimensiones de la zona central (ZC), zona interna (ZI), zona intermedia (ZINT) y zona externa (ZE) del croma fueron medidas con un calibrador. Los radiales (RAD) se cuantificaron en un ángulo de 90º y las nubes (NU) en toda la circunferencia de la ZE. Los hoyos (HO) se contaron en la totalidad de las ZI y ZINT. Se realizó un análisis de correlación y regresión lineal múltiple entre los resultados de los componentes de los cromatogramas de Pfeiffer y los obtenidos del análisis de las variables convencionales evaluadas en los RO en transformación. Para el análisis estadístico se utilizó el programa estadístico SAS versión 9.0. Se utilizó el programa SPSS para graficar los resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las variables convencionales analizadas en los RO sometidos a vermicompostaje se presentan en el Cuadro 1, mientras que los resultados de los componentes de los cromatogramas se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Caracterización de los residuos orgánicos sometidos a vermicompostaje durante 183 días de transformación.

	Días de establecido el estudio								
Parámetro	**4**	**35**	**68**	**98**	**127**	**141**	**155**	**168**	**183**
Nitrógeno total (%)	1.42a	1.46a	1.76b	1.66b	1.65ab	1.72bc	1.74bc	1.64ab	1.81c
Carbono orgánico (%)	29.95a	28.85a	21.24d	23.42bd	20.34cd	18.09c	23.17bd	20.29cd	23.23bd
Relación C/N	21.10a	20.19a	12.10c	14.17b	12.39bc	10.66c	13.33b	12.47bc	12.91bc
pH	8.94a	7.72b	7.62c	7.14d	7.27cd	7.45c	7.57c	7.30cd	7.46c

Las letras minúsculas representan diferencias significativas ($p<0.05$) entre días de descomposición.

Cuadro 2. Caracterización de los cromatogramas obtenidos a partir de los residuos orgánicos sometidos a vermicompostaje durante 183 días de transformación.

		Días de establecido el estudio								
Parámetro		**4**	**35**	**68**	**98**	**127**	**141**	**155**	**169**	**183**
RAD	núm.	13.72e	13.56e	14.17e	14.11e	14.78d	15.00d	16.00c	17.67b	18.89a
NU	núm.	24.56a	27.11a	29.61b	30.56b	35.22c	36.44c	40.89d	50.56e	51.22e
HO	núm.	0.17a	0.50a	0.83a	1.89b	2.00b	3.44c	4.89d	9.67e	10.67f
ZC	mm	10.69d	11.95d	14.66c	17.72b	21.31a	11.46d	10.31d	9.70d	9.38d
ZI	mm	14.43cd	10.38d	14.96b	11.49c	8.21d	13.87cd	19.40a	17.64a	16.78b
ZINT	mm	8.63b	11.04a	8.08b	13.00a	8.83ab	12.56a	11.52a	11.66a	10.91a
ZE	mm	12.42a	13.69a	13.93a	11.59a	13.52a	11.74a	8.17b	9.81b	9.83b

RAD: radiales, NU: nubes, HO: hoyos, ZC: zona central, ZI: zona interna, ZINT: zona intermedia, ZC: zona externa. Las letras minúsculas representan las diferencias significativas $p<0.05$ entre días de descomposición.

Se encontraron correlaciones significativas entre los componentes de los cromas de CCP y los parámetros convencionales indicadores de madurez de AO. Con valores de R^2 superiores a 0.400 se registraron las siguientes relaciones: las variables Cot, relación C/N

y pH mostraron tendencia con respecto a la variable número de NU, concentrándose principalmente en valores entre 11/1 y 13/1 para la relación C/N, mientras que el contenido de Cot disminuyó hasta estabilizarse en un rango de 20-25%, a medida que aumentaban las NU, con una tendencia cuadrática. Además, se observó que, a medida que el pH disminuía, el contenido de NU tendía a aumentar. La relación C/N presentó una tendencia cúbica con el componente HO, estabilizándose en valores de 1 – 5 HO, pero incrementando cuando HO superaba 8. La variable pH presentó una relación cúbica significativa con NU, donde un pH más bajo correspondía a un aumento en NU.

Con valores de R^2 menores de 0.400 resultaron las siguientes correlaciones: se identificaron tendencias cúbicas entre Cot y el número de HO y de RAD, indicando relaciones complejas en estos parámetros. Entre las relaciones C/N y ZINT, y C/N y RAD hubo gran variabilidad; sin embargo, la mayor concentración de puntos se encontró cuando la relación C/N estuvo entre 11/1 y 13/1, con un grosor de ZINT entre 10 y 12 mm, y RAD entre 14 y 18. El contenido de Nt tuvo baja correlación con los componentes de los cromas, aunque se mantuvo en el rango específico 1.4-1.8%, en ciertos niveles de HO y NU.

Los resultados obtenidos para los RO sometidos a vermicompostaje mostraron un incremento en la cantidad de NU, un componente de la CCP que refleja la variedad enzimática y las fracciones húmicas presentes en el material, así como de RAD los cuales indican la actividad biológica (Restrepo y Pinheiro, 2011). Estos hallazgos coinciden con los reportados por Chilón y Chilón (2015), quienes observaron que los cromas elaborados a partir del análisis de caldo de humus presentaron una mayor actividad microbiológica, evidenciada por la abundancia de NU y la presencia constante de RAD en todo el croma. Sin embargo, estos autores también señalaron que la ZINT mostró un mayor espesor en comparación con las otras zonas, ya que, según Restrepo y Pinheiro (2011), el ancho de la ZINT refleja la cantidad de MO, una relación que no fue completamente consistente con los resultados de este estudio. Se observó que el grosor o el número de las características evaluadas en los componentes de los cromas mostró un mayor grado de significancia en relación con las variables químicas analizadas a partir de los 127 DDE, momento en el cual estos valores alcanzaron rangos considerados de madurez (SEMARNAT, 2018). Esto indica que, a partir de ese punto, las VC alcanzaron un nivel de estabilidad y madurez que puede ser detectado mediante estas variables cromatográficas.

Se ha indicado, además, que el número de RAD aporta información sobre los valores de Cot y de relación C/N en los AO y en muestras de suelo, en que la disminución de los RAD disminuye el valor de Cot y de la relación C/N (Arteaga-Barrueta *et al.,* 2021). La variabilidad en los datos obtenidos resalta la complejidad de interpretar los resultados derivados de la técnica CCP, lo que subraya la necesidad de profundizar en las características específicas de cada zona del croma, así como de correlacionar estos resultados con métodos cuantitativos que permitan una interpretación más precisa (Burle y Figueiredo, 2019).

CONCLUSIONES

Los resultados permitieron establecer el uso de la CCP para la predicción de la concentración de Cot y los valores de relación C/N y pH en las VC a partir de características destacadas por su consistencia en la predicción de la madurez en los RO transformados.

Se encontró que los componentes nubes, hoyos, radiales y la zona central de los cromas fueron los que mayor correlación presentaron con las variables químicas Cot, Nt, relación C/N y pH para VC, lo que resulta de gran relevancia ya que dichas variables alcanzaron valores identificados como indicadoras de madurez a partir del día 127 de establecido el estudio. El establecimiento de rangos de estabilidad de las relaciones significativas específicas para cada variable química y el componente del croma correspondiente, hace más selectivo su uso. Estos resultados aportan valiosos indicadores para usar el análisis cromatográfico de Pfeiffer en la evaluación de la madurez y calidad de los abonos, complementando métodos convencionales.

AGRADECIMIENTO

Al Fondo Estatal de Ciencia y Tecnología del Gobierno de Chihuahua, México [F-126-2024-J], por su apoyo financiero para el presente trabajo de investigación.

BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, S.E., Piraneque, N.V., Díaz, C.J. (2019). Valoración del estado del suelo en zona de bosque seco tropical mediante técnicas analíticas y cromatogramas. *Información tecnológica*, 30(6): 337-350 http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600337.

Arteaga-Barrueta, M., Yesca-Jarquín, C., Álvarez-González, A., Otaño-Corona, L., Pino-Roque, J.A., Evangelista, A.C., *et al*. (2021) Radial chromatography for systemic monitoring of soils with different management. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 30(3). https://www.redalyc.org/journal/932/93268280003/.

Burle, E.C. & Figueiredo, R.T. (2019). Uso da Cromatografía Circular Plana em diferentes concentrações para análise de solo e de compostos orgânicos. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE 5(2): 19-28.

Céspedes, D.G. & Gutiérrez, L.R. (2014). Métodos y parámetros para determinar la madurez en el compost a nivel de fincas. *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo*, 14(26).

Gordillo, F., Peralta, E., Chávez, E., Contreras, V., Campuzano, A., Ruiz, O. (2011). Producción y evaluación del proceso de compostaje a partir de desechos agroindustriales de Saccharum officinarum (caña de azúcar). *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 37 (2): 140-149. http://hdl.handle.net/20.500.12123/6404.

Hernández-Rodríguez, O.A., Ávila-Quezada, G.D., García-Muñoz, S.A. (2021). Situación actual del recurso suelo en México y la incorporación de abonos orgánicos como estrategia para su conservación. En: Aproximaciones teórico-metodológicas para el análisis territorial y el desarrollo regional sostenible I. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Económicas y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional https://ru.iiec.unam.mx/5454/.

Mupambwa, H.A. & Mnkeni, P.N.S. (2018). Optimizing the vermicomposting of organic wastes amended with inorganic materials for production of nutrient-rich organic fertilizers: a review. *Environmental Science and Pollution Research,* 25: 10577-10595. https://doi.org/10.1007/s11356-018-1328-4.

Ortega, M., Cerón-Muñoz, M.F., Medina-Sierra, M. (2023). Espectroscopía de infrarrojo cercano para la determinación de materia orgánica y nitrógeno total del suelo. *Ciencia en Desarrollo*, 14(1): 111-118. https://doi.org/10.19053/01217488.v14.n1.2023.13942.

Restrepo, R.J. & Pinheiro, S. (2011). Cromatografía. 21 ed. Cali: Impresora Feriva. Cali, Colombia. 250 p.

Sánchez-Rosales, R., Hernández-Rodríguez, O.A., Jiménez-Castro, J.A., Ojeda-Barrios, D.L., Guerrero-Prieto, V.M., Parra-Quezada, R.A. (2019). Modelos de predicción del índice de madurez de abonos orgánicos producidos con tres procesos de transformación. *Información Técnica Económica Agraria,* 115(3). https:// doi.org/10.12706/itea.2018.033.

SEMARNAT. (2018). NMX-AA-180-SFI-2018 Norma Mexicana que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales. Secretaría de Medio Ambiente Recursos y Naturales. México. https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD1/NMX-AA-180-SCFI-2018.pdf. Fecha de consulta: 07 de abril 2025.

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA FOTOSINTÉTICA DE LA ACELGA CULTIVADA EN ZEOLITA BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO

Rodolfo Contreras Martínez[1]; Martín Díaz García[1]; Sandra Pérez Alvarez[1]; Esteban Sánchez Chavez[2]; Julio César Anchondo Páez[2]; Luisa Patricia Uranga Valencia[1]; Marina Imelda Terrazas Gómez[1]

[1] Universidad de Chihuahua, Km 2.5 carretera a Rosales, Campus Delicias, C. P. 33000, Delicias, Chihuahua, México.
[2] Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo AC, Unidad Delicias, Cd. Delicias, Chihuahua C.P. 33089, México.

Correo del autor de correspondencia: spalvarez@uach.mx

RESUMEN

La zeolita al ser un mineral de tipo volcánico tiene capacidad de intercambio catiónico y retención de agua, lo que le permite mejorar las propiedades del sustrato y la eficiencia de los cultivos hortícolas. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la zeolita pura y la zeolita comercial sobre parámetros fisiológicos en cultivos de acelga (bajo condiciones controladas de invernadero. Para ello se establecieron cinco tratamientos utilizando un diseño completamente aleatorizado siendo el T1= Control (peat moss); T2= 1 L de peat moss + 200 g de zeolita pura; T3=1 L de peat moss + 400 g de zeolita pura; T4=1 L de peat moss + 200 g de zeolita comercial y T5= 1 L de peat moss + 400 g de zeolita comercial. Los parámetros evaluados fueron la actividad fotosintética, la conductancia estomática, la transpiración y la fluorescencia de la clorofila, y las mediciones se realizaron con un medidor portátil LI-COR 6400 en las hojas cuando las plantas alcanzaron su madurez fisiológica, entre las 10:00 a.m. y las 11:00 a.m. Los resultados obtenidos mostraron que los parámetros evaluados fueron más eficientes al utilizar 200 g de zeolita pura, encontrándose diferencias significativas con los otros tratamientos, excepto en la fluorescencia de la clorofila donde el control (T1) y el T2 no presentaron diferencias significativas. Estos resultados indican que la incorporación de 200 g de zeolita pura a un sustrato puede ser una práctica útil para mejorar el comportamiento fisiológico de la acelga en condiciones de invernadero.

PALABRAS CLAVE: *Beta vulgaris* var. cicla L.; *conductancia estomática*; *fotosíntesis; zeolita comercial; zeolita pura.*

INTRODUCCIÓN

La población mundial continúa en un aumento creciente y con ello la demanda de alimentos que conlleva a un incremento en la utilización de fertilizantes químicos (Sharpley *et al*., 1987). Aunado a esto, el recurso suelo se agota y el cambio climático se intensifica, lo que provoca cambios en los cultivos (Malhi *et al*., 2021; Salewski *et al*., 2010). Es en este escenario que la zeolita adquiere una gran relevancia ya que tiene una fenomenal capacidad de adsorción y características altamente funcionales de retención y

liberación de agua y nutrientes; si se trata de nutrientes, también ayuda a minimizar su pérdida, por lo que su uso es favorecido para apoyar la disponibilidad de agua, junto con parámetros fisiológicos como la concentración total de proteínas, contenido de clorofila, mayor actividad de defensa antioxidante, reduciendo los efectos adversos del estrés abiótico (como sequía, temperaturas extremas o salinidad) lo que se traduce en un mayor crecimiento y rendimientos de los cultivos (Javaid *et al*., 2024; Babaousmail *et al*., 2022; Rahimi *et al*., 2021). La acelga (*Beta vulgaris var. cicla* L.) es una verdura de hoja verde representando un elemento clave para una alimentación equilibrada, debido a su alto contenido de vitaminas, minerales y otros nutrientes esenciales, razón por la cual, a nivel internacional se fomenta su consumo como una estrategia para fortalecer la nutrición. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la zeolita pura y la zeolita comercial mezcladas con un sustrato comercial (peat moss) sobre parámetros fisiológicos relacionados con la fotosíntesis de la acelga bajo condiciones controladas de invernadero.

MATERIALES DE MÉTODOS

El experimento se realizó en el invernadero #1 de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales de la Universidad Autónoma de Chihuahua, Campus Delicias, durante el ciclo primavera-verano 2025. Las semillas de *B. vulgaris* var. cicla se sembraron en peat moss como sustrato suplementado con zeolita que comprendían los siguientes tratamientos: T1= Control (solamente peat moss), T2= 1 L de peat moss + 200 g de zeolita pura, T3=1 L de peat moss + 400 g de zeolita pura, T4=1 L de peat moss + 200 g de zeolita comercial y T5= 1 L de peat moss + 400 g de zeolita comercial. Se sembraron 20 plantas por tratamiento y se muestrearon 10.

Los parámetros evaluados fueron la actividad fotosintética, la conductancia estomática, la transpiración y la fluorescencia de la clorofila. Estas mediciones se realizaron en las hojas cuando las plantas alcanzaron su madurez fisiológica, entre las 10:00 a.m. y las 11:00 a.m. Se utilizó un medidor portátil LI-COR 6400 (Lincoln, Nebraska, E.U.A.), seleccionando para cada medición en cada planta hojas sanas, de color uniforme y sin daños visibles. La cámara de referencia se configuró con una concentración de CO_2 de 400 µmol mol^{-1}, mientras que en la cámara de muestra se mantuvo cerca de 380 µmol mol^{-1}. El déficit de presión de vapor del aire en la cámara de muestra fue inferior a 1.5 kPa, y la temperatura del bloque que sostenía la hoja se mantuvo a 25 °C. La actividad fotosintética se expresó en µmol CO_2 $m^{-2} \cdot s^{-1}$, la conductancia estomática en mmol CO_2 $m^{-2} \cdot s^{-1}$, la transpiración en µmol H_2O $m^{-2} \cdot s^{-1}$ y la fluorescencia máxima de la clorofila como Fm'.

Se empleó un diseño experimental completamente al azar. Los datos fueron analizados en cuanto a la normalidad y homogeneidad de varianza, posteriormente, se realizó un análisis de varianza (α=0.05). Las diferencias entre las medias de los tratamientos se compararon mediante la prueba de Tukey ($p<0.05$). Para los análisis se utilizó el paquete estadístico SAS versión 9.4.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La producción y acumulación de biomasa en las plantas, depende en gran medida de un equilibrio eficiente entre la asimilación de carbono y la pérdida de agua por transpiración, que a su vez necesita del intercambio gaseoso, regulado por la apertura y cierre de los estomas, lo cual influye directamente en la disponibilidad de CO_2, así como en la generación de ATP y NADPH (Matthews *et al*., 2017). La actividad fotosintética, conductancia estomática, tasa de transpiración y fluorescencia de la clorofila y en el cultivo de acelga cultivada con peat moss suplementado con diferentes cantidades de zeolita comercial y pura se muestra en la Figura 1.

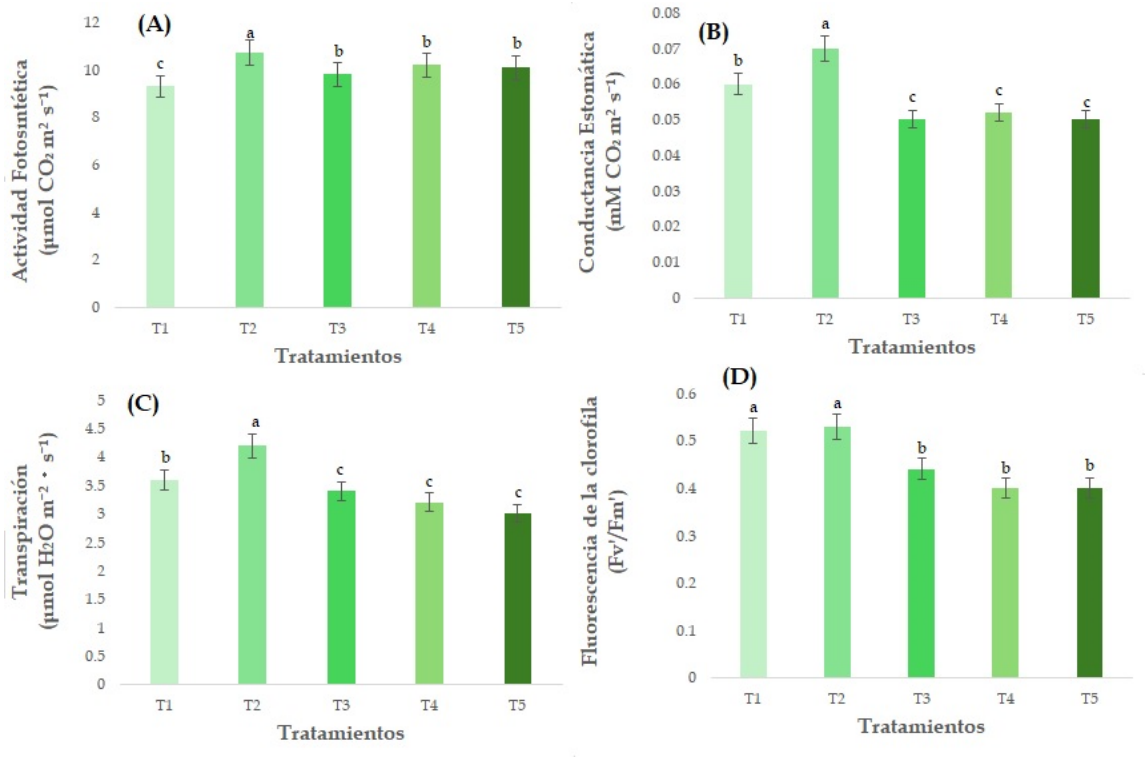


Figura 1. Efecto de diferentes dosis de zeolita pura y comercial sobre la actividad fotosintética (A), conductancia estomática (B), tasa de transpiración (C), y fluorescencia de la clorofila (D) en plantas de acelga (*B. vulgaris* var. cicla) donde: T1= Control (peat moss); T2= 1 L de peat moss + 200 g de zeolita pura; T3=1 L de peat moss + 400 g de zeolita pura; T4=1 L de peat moss + 200 g de zeolita comercial y T5= 1 L de peat moss + 400 g de zeolita comercial.

Las plantas de acelga cultivadas utilizando 1 L de peat moss como sustrato con 200 g de zeolita pura (T2) obtuvieron los mejores resultados en todos los parámetros fisiológicos estudiados, con diferencias significativas con respecto a todos los demás tratamientos, excepto en la fluorescencia de la clorofila (D), donde no se encontraron diferencias significativas con respecto al tratamiento control (T1). Al comparar el T2 con el control, la actividad fotosintética (A) aumentó un 11.5 %, mientras que la conductancia estomática (B) y la transpiración (C) aumentaron un 11.7% y un 11.6%, respectivamente,

en todos los casos con diferencias significativas como se observa claramente en la Figura 1.

Estos resultados reflejan la estrecha relación que existe entre la fotosíntesis, la conductancia estomática y la tasa de transpiración, común en muchas condiciones ambientales (De Smedt *et al*., 2017). Cuando los estomas se abren y permiten la entrada de CO_2 y la salida de vapor de agua (transpiración), se promueve simultáneamente la absorción de agua y nutrientes. Long *et al*. (2004) afirmaron que la aplicación foliar de zeolita aumentó la concentración de CO_2 alrededor de los estomas, favoreciendo así tasas fotosintéticas más altas en especies C3 como la uva (*Vitis vinifera* L.), el tomate (*Solanum lycopersicum* L.), la manzana (*Malus domestica* Borkh.) y la naranja (*Citrus* × *sinensis* (L.) Osbeck.) Aunque aquí se utilizó zeolita como enmienda del sustrato, se obtuvieron resultados similares, lo que sugiere que puede tener una función comparable a la de la aplicación foliar para mejorar la eficiencia fotosintética.

Estudios previos respaldan esta tendencia. Wang *et al*. (2024) reportó que el empleo de zeolita H-SSZ-13 en invernaderos del cultivo de tomate (*S. lycopersicum*) aumentó en un 40% la tasa neta de fotosíntesis y mejoró con significancia la productividad del cultivo. De manera similar, Martins *et al*. (2024) ilustraron que para los olivos (*Olea europaea* L.) tratados con zeolita y biocarbón hubo un incremento gradual en la conductancia estomática, el contenido relativo de agua y la fotosíntesis neta. Del mismo modo, Bybordi (2016) informó que la aplicación de zeolita en el suelo para el cultivo de canola (*Brassica napus* L.) incrementó notablemente la actividad fotosintética y la conductancia estomática.

El uso de zeolita pura, como suplemento de un sustrato comercial, en dosis moderadas, como los 200 g empleados en este estudio, mejora la disponibilidad de nutrientes esenciales (N, K, Mg) y la retención de agua sin afectar negativamente la porosidad del sustrato, que de otro modo causaría compactación o reduciría la disponibilidad de oxígeno para las raíces (Ming y Mumpton, 2003). Estas condiciones permitieron la apertura estomática, lo que determinó el aumento en la transpiración y la asimilación de CO_2, ya que la conductancia favoreció una mayor actividad fotosintética. Sin embargo, dosis excesivas de 400 g de zeolita provocan una adsorción extrema de nutrientes o alteran la relación agua-aire en el sustrato, reduciendo así la disponibilidad inmediata de nutrientes y oxígeno, lo que disminuye la eficiencia estomática y afecta negativamente la fotosíntesis y la fluorescencia de la clorofila (Mumpton, 1999).

En este caso, una dosis intermedia de zeolita pura (200 g) mezclada con el sustrato comercial mantiene un ambiente edáfico favorable para los procesos fisiológicos clave en la acelga. Este equilibrio hídrico y nutricional podría correlacionarse con un aumento de la fluorescencia máxima (Fv/Fm), un parámetro que mide el rendimiento del fotosistema II. Este parámetro indicó que los fotosistemas son más eficientes y, por lo tanto, menos propensos al estrés ambiental (Genty *et al.,* 1989).

CONCLUSIONES

La aplicación de 200 g de zeolita pura como suplemento del sustrato comercial peat moss en el cultivo de acelga (*B. vulgaris var. Cicla*) bajo condiciones de invernadero

favoreció significativamente la actividad fotosintética, la conductancia estomática y la transpiración, en comparación con la aplicación de mayores dosis (400 g) de zeolita pura o de zeolita comercial. Estos resultados respaldan el uso de zeolita pura como una alternativa para mejorar la respuesta fisiológica de la acelga, destacando su potencial como enmienda agrícola sostenible en sistemas protegidos, aunque se recomienda realizar estudios complementarios que evalúen su efecto en todas las etapas del desarrollo del cultivo, así como en diferentes especies hortícolas y condiciones de manejo.

BIBLIOGRAFÍA

Babaousmail, M., Nili, M.S., Brik, R., Saadouni, M., Yousif, S.K., Omer, R.M. & El-Taher, A.M. (2022). Improving the tolerance to salinity stress in lettuce plants (*Lactuca sativa* L.) using exogenous application of salicylic acid, yeast, and zeolite. *Life 12*(10), 1538. https://doi.org/10.3390/life12101538.

Bybordi, A. (2016). Influence of zeolite, selenium and silicon upon some agronomic and physiologic characteristics of canola grown under salinity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis 47*(7), 832–850.

De Smedt, C., Steppe, K. & Spanoghe, P. (2017). Beneficial effects of zeolites on plant photosynthesis. *Advanced Materials Science 2*(1),1-11. https://doi.org/10.15761/AMS.1000115.

Genty, B., Briantais, J. & Baker, N. (1989). The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects 990*(1), 87–92.

Javaid, A., Munir, N., Abideen, Z., Siddiqui, Z. & Hong Yong, J. (2024). The role of natural and synthetic zeolites as soil amendments for mitigating the negative impacts of abiotic stresses to improve agricultural resilience. *Plant Stress 14*, 100627. https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100627.

Long, S.P., Ainsworth, E.A., Rogers, A. & Ort, D.R. (2004). Rising atmospheric carbon dioxide: Plants FACE the future. *Annual Review of Plant Biology 55*, 591–628. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.55.031903.141610

Malhi, G.S., Kaur, M. & Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability 13*, 1318. https://doi.org/10.3390/su13031318.

Martins, S., Brito, C., Gonçalves, A., Moutinho-Pereira, J., Pereira, E., Arrobas, M., Rodrigues, M.A., Nunes, F., Correia, C.M. (2024). Differential responses of photosynthesis, yield and soil properties 4 years after a single application of zeolites and biochar in a rainfed olive orchard. *Soil Use Manage* 40, e13045. https://doi.org/10.1111/sum.13045.

Matthews, J.S., Vialet-Chabrand, S.R. & Lawson, T. (2017). Diurnal variation in gas exchange: The balance between carbon fixation and water loss. *Plant Physiology* 174, 614–623. https://doi.org/10.1104/pp.17.00152.

Ming, D.W. & Mumpton, F.A. (2003) Zeolites in Soil. In *Minerals and Soil Environments* (pp.873-911). Dixon, J.B.; Weed, S.B (Ed), Soil Science Society of America, Madison.

Mumpton, F. A. (1999). La roca mágica: usos de las zeolitas naturales en agricultura y la industria. *Proceedings of the National Academy of Sciences 96*(7), 3463–3470.

Rahimi, E., Nazari, F., Javadi, T., Samadi, S. & da Silva, J.A.T. (2021). Potassium-enriched clinoptilolite zeolite mitigates the adverse impacts of salinity stress in perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) by increasing silicon absorption and improving the K/Na ratio. *Journal of Environmental Management 285*, 112142.

Salewski, V., Hochachka, W.M. & Fiedler, W. (2010). Global warming and Bergmann's rule: Do central European passerines adjust their body size to rising temperatures? *Oecologia 162*, 247–260.

Sharpley, A.N., Smith, S.J. & Naney, J.W. (1987). Environmental impact of agricultural nitrogen and phosphorus use. *Journal of Agricultural and Food Chemistry 35*, 812–817.

Wang, A., Wang, H., Lv, J., Liang, X., Ying, H., Wang, L., Yu, J., Xiao, F-Sh., Shi, K. (2024). Zeolite enhances leaf photosynthesis and fruit quality in tomato through greenhouse CO_2 enrichment. *Journal of Cleaner Production 444*, 141276.

IMPACTO DEL USO DEL AGUA DEL RÍO SALADO EN LA AGRICULTURA, HIDALGO

Elia Briones Corona[1,2]; Anabella Handal Silva[1,2]; Edelmira García Nieto[4]; Libertad Juárez Santacruz[4]; José Victor Tamariz Flores[1,3]; José Luis Morán Perales[2]

[1] Posgrado en Ciencias Ambientales, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Ciudad Universitaria, Colonia San Manuel, CP 72470, Puebla, Puebla, México.
[2] Departamento de Biología y Toxicología de la Reproducción, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 14 sur 6301, Colonia San Manuel, CP 72470, Puebla, Puebla, México.
[3] Departamento de Investigación en Ciencias Agrícolas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. 14 sur 6301, Colonia San Manuel, CP 72470, Puebla, Puebla, México.
[4]Centro de Investigación en Genética y Ambiente, Universidad Autónoma de Tlaxcala, km 10.5 Autopista San Martín-Tlaxcala, C. P. 90120, Ixtacuixtla, Tlaxcala, México.

Correo del autor de correspondencia: eliabrionescorona@gmail.com

RESUMEN

El río Salado, ubicado en el Valle de Tula, Hidalgo, recibe aguas residuales de la Ciudad de México desde 1900, a través del Drenaje General del Valle de México. Estas aguas son reutilizadas para el riego de diversos cultivos agrícolas, entre los que destacan alfalfa, maíz, frijol y trigo. Se evaluó la calidad del agua del río Salado en 30 muestras colectadas de cinco zonas de muestreo, en época de lluvia y estiaje (2024-2025). Se determinaron *in situ* los parámetros: pH, OD, CE, temperatura en agua y ambiental. En laboratorio se cuantificaron: DBO_5, DQO, siete metales pesados, arsénico, cianuro y catorce compuestos orgánicos volátiles (COV´s). En época de lluvia se registraron los valores más altos de pH (8.20–8.44) y CE (1.57–1.66 mS/cm). El OD disminuyó de 5.70 mg/l en lluvias a 0.0 mg/l en estiaje. La DBO_5 (34-49.33 mg/l) y DQO (133-505.33 mg/l) superaron el límite máximo permisible (LMP) de la NOM-001-SEMARNAT-2021. Las concentraciones de metales pesados, arsénico y cianuro superaron los límites máximos permisibles (LMP) de la CE-CCA-001/89 y la Agencia de Protección Ambiental (EPA) en lluvia y estiaje. Las concentraciones de COV´s sobrepasaron la NMX-AA-103-SCFI-2006 y fueron mayores en estiaje. Se identificaron y cuantificaron 23 compuestos químicos, de los cuales siete son carcinógenos y siete posibles carcinógenos, según la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC). Estos resultados evidencian el potencial daño tóxico que el agua del río Salado puede causar a la salud pública y los ecosistemas.

PALABRAS CLAVE: *Contaminación; compuestos orgánicos volátiles; metales pesados; riego agrícola; río Salado.*

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, México ocupa el segundo lugar en el reúso de aguas residuales, destinando el 76% al riego agrícola (IMTA-SEMARNAT, 2016). La escasez de agua constituye un factor limitante para la producción agrícola, particularmente en regiones con estrés hídrico, bajo nivel socioeconómico y crecimiento poblacional acelerado, como es el caso del estado de Hidalgo. En este contexto, el reúso de aguas residuales se ha

convertido en una alternativa viable para atender la creciente demanda del recurso hídrico (Jaramillo y Restrepo, 2017).

En la región del Valle de Tula, Hidalgo, se reciben aguas residuales de la Ciudad de México desde 1900, a través de tres canales artificiales: el Interceptor Principal, el Interceptor de Occidente y el Gran Canal de Desagüe, construidos para evitar inundaciones y evacuar las aguas negras de la Zona Metropolitana del Valle de México. Actualmente, las aguas del río Salado se destinan al riego agrícola de aproximadamente 80,000 hectáreas, predominando cultivos de maíz y alfalfa. Cerca del 80% de los agricultores de la región opta por el cultivo de alfalfa, dada su alta rentabilidad y su importancia en la alimentación de ganado durante la época de estiaje (Ramos *et al.*, 2018); Espejel-García *et al.* 2016; Reyes-Solís *et al.* 2009; Jiménez y Chávez 2004; Huerta *et al.* 2002). El objetivo de este estudio fue evaluar la calidad del agua del río Salado en Hidalgo, durante las épocas de lluvia y estiaje, conforme a los criterios establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas y la EPA.

MATERIALES Y MÉTODOS

El río Salado, ubicado en el Valle de Tula, Hidalgo, forma parte de la Región Hidrológica RH26 del río Pánuco, dentro de la cuenca del río Moctezuma y la subcuenca del río Salado. A lo largo de sus 47 km se identificaron cinco zonas de muestreo (Z1-Z5). La colecta del agua en épocas de lluvia y estiaje fue por triplicado y se evaluaron conforme la NOM-001-SEMARNAT-2021. Los parámetros determinados *in situ* fueron: pH, T° del agua y ambiente, oxígeno disuelto (OD) y conductividad eléctrica (CE). En laboratorio se determinaron: DBO_5, DQO, metales pesados (Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y Zn), As, CN- y COV´s (benceno, clorobenceno, cloroformo, cloruro de vinilo, 1,4 diclorobenceno, 1,2 dicloroetano, 1,2 dicloroetileno, hexaclorobenceno, hexaclorobutadieno, metiletilacetona, piridina, tetracloroetileno, tetracloruro de carbono y tricloroetileno).

La DBO_5 se determinó mediante incubación por diluciones, conforme a la NMX-AA-028-SCFI-2001; la DQO por reflujo abierto, de acuerdo a la NMX-AA-030/2-SCFI-2012; los metales pesados por espectrofotometría de absorción atómica, con base en la NMX-AA-051-SCFI-2016 y los COV´s por cromatografía de gases acoplado a un espectrofotómetro de masas, de acuerdo a la NMX-AA-103-SCFI-2006. Los resultados se compararon con los LMP establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-2021 y la CE-CCA-001/89. El análisis estadístico incluyó la prueba T-Student para datos paramétricos y la prueba U de Mann Whitney para datos no paramétricos, utilizando el software SPSS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos demostraron que la temperatura del agua (18.68-27.75°C), ambiental (22.03-33.95°C) y el pH (8.20–8.44) se encontraron dentro de los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021 y la CE-CCA-001/89, mientras que la CE (1.57–1.66 mS cm^{-1}), la DBO_5 (34 mg L^{-1} - 49.33 mg L^{-1}) y la DQO (133 mg L^{-1} -505.33 mg L^{-1}) superaron los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-2021 y la CE-CCA-001/89. El OD disminuyó de 5.70 mg L^{-1} en lluvias a 0.0 mg L^{-1} en estiaje. La temperatura del agua,

ambiental y CE no presentaron diferencias significativas entre épocas de muestreo, mientras el pH, OD, BDO_5 y DQO mostraron diferencias significativas, siendo mayor en época de estiaje en relación con la época de lluvias.

Los valores elevados de CE, BDO_5 y DQO se asocian con alta carga de materia orgánica, lo que reduce la disponibilidad de OD, como se observó en la época de estiaje (Adina *et al*., 2014). Aunado a que, un pH neutro a ligeramente alcalino puede limitar la degradación de la materia orgánica por la actividad microbiana e influir en la solubilidad y movilidad de diversas sustancias químicas (García-Rodríguez *et al*., 2021).

En la zona de estudio, se identificaron siete metales pesados (MP), Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y Zn, un metaloide (As) y CN- (Figura 1). Todos sobrepasaron el LMP de la CE-CCA-001/89 y la EPA, mientras que el Cu, Hg, Ni, Pb, Zn y el CN- también superaron la NOM-001-SEMARNAT-2021. Los MP (Cd, Hg y Ni) mostraron diferencias significativas entre épocas. Las concentraciones más altas de MP se registraron en la época de estiaje, en las zonas Z2 y Z3, y fueron: Cd (0.35 mg L^{-1} y 0.41 mg L^{-1}), Cr (1.57 mg L^{-1} y 1.52 mg L^{-1}) y Hg (0.46 mg L^{-1}). En las zonas Z1 y Z3, Cu (34.67 mg L^{-1} y 20 mg L^{-1}). En las zonas Z3, Z4 y Z5, Ni (14.33 mg L^{-1}, 14.00 mg L^{-1} y 16.33 mg L^{-1}) y en la Z3, Zn (31.33 mg L^{-1}). Por otro lado, durante la época de lluvias, en la Z2 se encontró Pb (1.67 mg L^{-1}), CN- (3.53 mg L^{-1}) y As (0.33 mg L^{-1}).

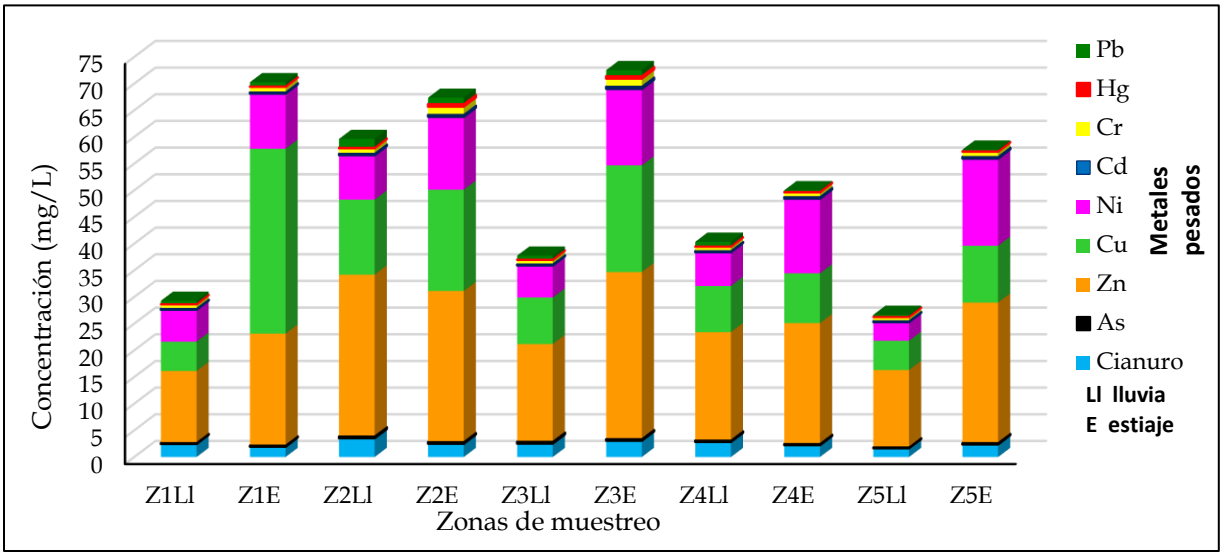


Figura 1. Concentración de metales pesados, As y CN- en agua del río Salado en época de lluvia y estiaje.

Las concentraciones de Cu y Pb en el río Salado fueron superiores a las reportadas en 2017 en la microcuenca de Zimapán, Hidalgo, donde encontraron niveles de Cu entre 0.011 mg L^{-1} y 0.051 mg L^{-1}, y de Pb entre 0.044 mg L^{-1} y 0.577 mg L^{-1} (Macedo-Cruz *et al*., 2017). En el Distrito de Riego 03 de Tula, Domínguez-Islas (2021) reportó Cd (1.4 mg kg^{-1}), Pb (12.8 mg kg^{-1}) y Cr (10.7 mg kg^{-1}) en suelos, así como Cd (7 mg kg^{-1}) y Cr (7.4 mg kg^{-1}) en cultivos irrigados con estas aguas. Un estudio reciente en la cuenca hidrológica del río Tula evidenció que los MP (Pb, As, Hg y Cd) se infiltran y acumulan en el subsuelo de zonas agrícolas irrigadas a lo largo del tiempo (Vega-Ortiz *et al*., 2024). Este incremento

de metales pesados en el agua del río Salado puede deberse al incremento de fuentes antropogénicas como la minería, la metalurgia, la agricultura y el transporte.

Se identificaron catorce COV´s: benceno, clorobenceno, cloroformo, cloruro de vinilo, 1,4 diclorobenceno, 1,2 dicloroetano, 1,2 dicloroetileno, hexaclorobenceno, hexaclorobutadieno, metiletilacetona, piridina, tetracloroetileno, tetracloruro de carbono y tricloroetileno (Figura 2). Todos los COV´s superaron el LPC de la NMX-AA-103-SCFI-2006 y presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las épocas de muestreo a excepción del benceno, 1, 2 dicloroetileno y tetracloruro de carbono. Las concentraciones más altas de COV´s se detectaron en la época de estiaje en la zona Z2, donde se encontró benceno (0.58 µg L^{-1}), clorobenceno (0.58 µg L^{-1}), 1,2 dicloroetileno (0.57 µg L^{-1}), tetracloruro de carbono (0.48 µg L^{-1}) y tricloroetileno (0.71 µg L^{-1}). En la zona Z3 cloroformo (0.58 µg L^{-1}), 1,4 diclorobenceno (0.22 µg L^{-1}), 1,2 dicloroetano (0.15 µg L^{-1}) y piridina (0.45 µg L^{-1}). En las zonas Z3 y Z5 hexaclorobenceno (0.16 µg L^{-1}), hexaclorobutadieno (0.13 µg L^{-1}) y metiletilacetona (0.16 µg L^{-1}). En la zona Z1 cloruro de vinilo (0.57 µg L^{-1}) y finalmente, en las zonas Z1, Z2 y Z3, tetracloroetileno (0.23 µg L^{-1}).

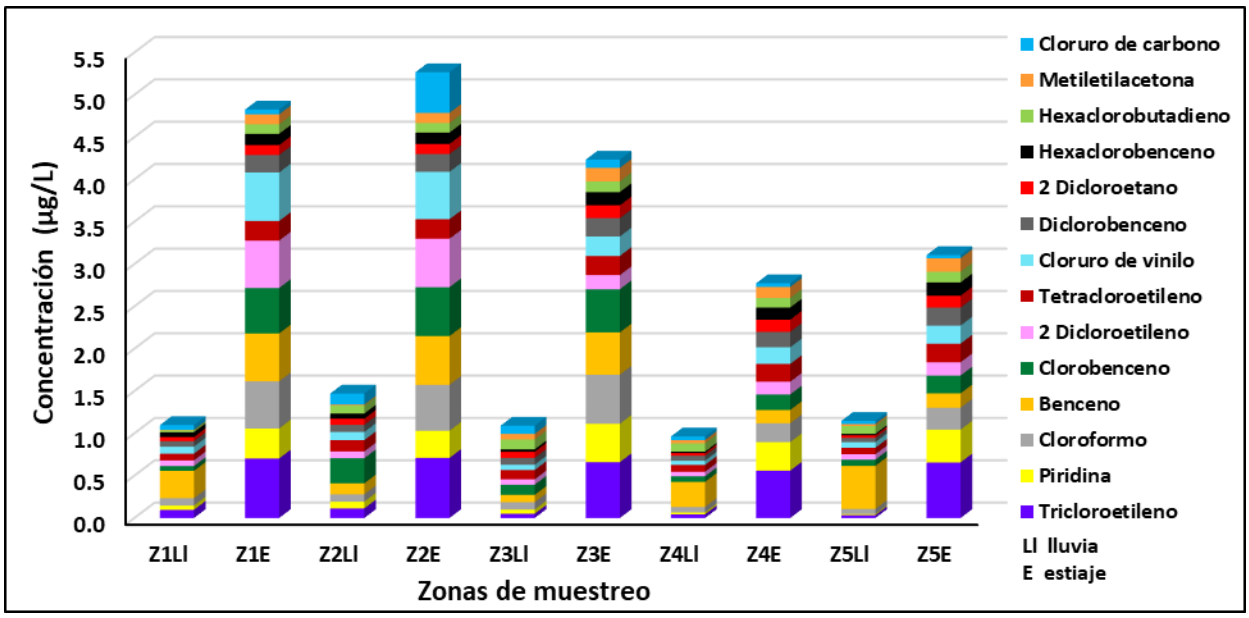


Figura 2. Concentración de COV´s en agua del río Salado en época de lluvia y estiaje.

Las zonas Z2 y Z3 presentaron la mayor concentración de metales pesados y COV´s, lo que podría estar asociado a la descarga de aguas residuales industriales del corredor Industrial Tula-Atitalaquia, el cual alberga 22 industrias incluyendo una refinería y una termoeléctrica (Gobierno de México, 2024; Hipólito, 2022). Es importante destacar que, de los 23 compuestos químicos identificados en el agua del rio Salado, siete están clasificados por la IARC como carcinógenos del Grupo 1 (Cd, Cr, Ni, As, benceno, cloruro de vinilo, tricloroetileno) y siete como posibles carcinógenos en el Grupo 2 (Pb, cloroformo, 1,2 dicloroetano, hexaclorobenceno, hexaclorobutadieno, tetracloruroetileno, tetracloruro de carbono) (IARC, 2019; Bustamante *et al*., 2015). Aunado a ello, existen reportes que indican que la incidencia de cáncer en la región se ha triplicado en la última

década, convirtiéndose en la cuarta causa de muerte en el área de influencia (Cabañas, 2023).

CONCLUSIONES

La investigación ha revelado que las aguas residuales de la Zona Metropolitana del Valle de México y las descargas industriales-urbanas del estado de Hidalgo han intensificado la contaminación del río Salado en la última década. Se identificaron 23 compuestos químicos, de los cuales siete son carcinógenos y siete posibles carcinógenos. Se concluye que el agua del río Salado se encuentra fuertemente contaminada y representa un riesgo significativo para la salud de los ecosistemas y la población.

BIBLIOGRAFIA

Adina, M.G., Dontu, S., Copacenaru, O., Gavril, V., Zaharia, F.A. & Carstea, E.M. (2014). Evaluation of the anthropogenic impact on the water quality of Dambovita river en 3rd International Conference - Water resources and wetlands. Petre Gâştescu, Petre Bretcan; ISSN: 2285-7923; 91-98.

Bustamante, J.J., Chaparro, A.L y Peláez, M.J. (2015). Impacto de las actividades antrópicas derivadas de la industria petrolera en relación con la presencia de metales pesados en la ganadería bovina colombiana. *Revista de Toxicología*, 32(2), 127-130.

Cabañas, C. (2023). Los olvidados de Hidalgo. +Focus. Sitio web: https://investigaciones.nmas.com.mx/los-olvidados-de-hidalgo/.

Domínguez-Islas, A.L. (2021). Análisis de fertilidad del suelo para el cultivo de alfalfa en el distrito de riego 0003 Tula, en el Estado de Hidalgo. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, México.

Espejel-García A., Barrera-Rodríguez A. & Cuevas-Reyes V. 2016. Dinámica de la innovación y ganancias económicas de la producción de leche en el Valle del Mezquital, Hidalgo. *Revista Electrónica Nova Scientia*, ISSN 2007-0705, N°17, 8 (2): 391 – 408

García-Rodríguez, G., Sandoval-Rojas, M.E., Corona-Romano, E.R., Jesús-de la Rosa R. E., Martínez-Romay B., García-Gil E. & García-Gil, E. (2021). Aplicación de dos metodologías para la evaluación de la calidad del agua de cuerpos superficiales destinados a la pesca en el sur del estado de Veracruz, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 37 (53681). DOI: https://doi.org/10.20937/RICA.53681.

Gobierno de México. (2024). Data México, Municipio de Hidalgo, Atotonilco de Tula. https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/atotonilco-de-tula.

Hipólito, N. (2022). Hidalgo cuenta con 12 parques industriales en Criterio.

Huerta, L., Contreras-Valadez, R., Palacios-Mayorga, S., Miranda, J., & Calva-Vásquez, G. (2002). Total elemental composition of soils contaminated with wastewater irrigation by combining IBA techniques. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms,* 189(14), 158–162.

IARC. (2019). Agentes clasificados por las monografías de la IARC, vol. 1– 123.https: //monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/09/ ClassificationsAlphaOrder.pdf

IMTA-SEMARNAT. (2016). Coordinación de Riego y Drenaje: Reúso de aguas residuales en la agricultura por Cisneros E.O.X. Saucedo R. H.

Jaramillo, M.F. & Restrepo, I. (2017). Wastewater reuse in agriculture: a review about its limitations and benefits. Sustainability. 9(2):1734-1753. https://doi.org/10.3390/su9101734.

Jiménez, B. & Chávez, A. (2004). Quality assessment of an aquifer recharged with wastewater for its potential use as drinking source: BEl Mezquital Valley^ case. *Water Science and Technology,* 50, 269–276.

Macedo-Cruz, A., Villegas-Romero, I., Carrillo-González, R. & Torres-Bautista, D. (2017). Contaminación por metales pesados de aguas superficiales en la microcuenca de Zimapán, Hidalgo. En: Pérez, F., Figueroa, E., Godínez, L y Rocha, J (eds.), Ciencias de la Química y Agronomía, Handbook T-I-ECORFAN, México,8-15.

Ramos, E. M. G., León G.F. & López, H.M. (2018) Aguas residuales provenientes de la Zona Metropolitana del Valle de México y sus efectos en el Valle del Mezquital. *Sociedades rurales, producción y medio ambiente,* 18(36):113-137.

Reyes-Solís, I. E., Solís, C., Isaac-Olive, K., García, N. E. & Andrade, E. (2009). Fractionation analysis of trace metals in humic substances of soils irrigated with wastewater in central Mexico by particle induced X-ray emission. *Microchemical Journal,* 91(1), 129–132.

Vega-Ortiz C., Larios-Ferrer J. L., Reyes-García J. C., Badillo-Maldonado M. & Kuri-Mar G. (2024). Numerical modelling of contaminant infiltration in the Tula river basin. *Publicación Semestral Pädi,* 12: 4, 213-220.

ACTIVIDAD DE MICROORGANISMOS RIZOSFÉRICOS DE PLANTAS DE café (*Coffea arabica* var. "Marsellesa")

Ricardo López Lazcano [1,2]; Dora Trejo Aguilar [2]; Ronald Ferrera Cerrato[1]; Sandra Cortés-Pérez[1]; Alejandro Alarcón[1]

[1] Colegio Postgraduados, Montecillo 56264, Estado de México. México
[2] Universidad Veracruzana, 91090, Xalapa, Veracruz. México.

Correo del autor de correspondencia: lopez.ricardo.7633@gmail.com

RESUMEN

El café es una de las bebidas más consumidas y demandadas en el mundo, por sus cualidades en aroma y sabor. Sin embargo, el cultivo de café es susceptible a plagas y enfermedades como la roya del café (*Hemileia vastatrix*) y nematodos. En este trabajo se aislaron bacterias de la rizósfera de plantas de café variedad Marsellesa, en la localidad de La Vereda/La Estanzuela, Las Margaritas, Pacho Viejo, Veracruz. Se utilizaron medios selectivos (agar nutritivo, medio Rennie y medio de Rodríguez) para evaluar la producción de ácido indolacético (AIA), solubilización de fosfatos (SF) y fijación de nitrógeno atmosférico (FN); además, se hizo un análisis filogenético a las bacterias aisladas. Las cepas que presentaron las mejores características en las pruebas bioquímicas fueron *Delftia acidovorans CS10, Delftia tsuruhatensis CS15, Stenotrophomonas sp. CS35, Rhizobium rhizogenes CS41, Alcaligenes faecalis CS45, Delftia lacustris CS51, Bacillus cereus CS60* y *Serratia marcescens CS76.* Estas bacterias demostraron capacidades funcionales relevantes como AIA, fijación de nitrógeno atmosférico y solubilización de fosfatos, y presentaron diversidad taxonómica importante, identificándose 30 especies pertenecientes a 18 géneros. Algunas de estas cepas han sido previamente reportadas en otros cultivos por sus cualidades como promotoras de crecimiento vegetal o agentes de biocontrol. Los resultados demuestran el potencial de la zona de la rizosfera de café como una fuente de microorganismos benéficos, con posibles aplicaciones para generar biofertilizantes y estrategias biotecnológicas para mejorar la sanidad y nutrición vegetal.

PALABRAS CLAVE: *Ácido Indol Acético; Solubilización de fosfatos; Fijación de nitrógeno; Identificación Molecular.*

INTRODUCCIÓN

El café arábigo representa aproximadamente entre el 80% y el 90% de la producción global (Figueroa y Pérez, 2016). En México, su producción se concentra en 4,800 municipios de 14 entidades federativas (SAGARPA, 2016). Las plantaciones de café son afectadas por bacterias, insectos u hongos como *Hemileia vastatrix* (roya del café) que infecta las hojas provocando su marchitamiento (Sánchez *et al*., 2024). Por ello, diversos estudios han generado variedades resistentes (Henderson, 2019), lo que representa una oportunidad para estudiar sus interacciones con microorganismos rizosféricos, con implicaciones importantes para la sanidad y el rendimiento del cultivo. El suelo rizosférico constituye un nicho ecológico que alberga diversos microorganismos que

interactúan de manera dinámica y simultánea con las plantas (Fulthorpe *et al*., 2020), desempeñando un papel importante en la producción de los cultivos, la nutrición vegetal y la protección frente patógenos (Raa Del Carpio *et al*., 2018; Duong *et al*., 2020). Los microorganismos se encuentran en residuos vegetales, dentro de las plantas o asociados a raíces (Prasetya *et al*., 2023). Las bacterias rizosféricas actúan como promotoras del crecimiento vegetal (PGPR por sus siglas en inglés), al producir ácido indolacético (AIA), solubilizar de nutrientes, y fijar nitrógeno atmosférico (Santoyo *et al*., 2012; Muñoz, 2024).

Por lo anterior, este trabajo aisló e identificó especies bacterianas cultivables presentes en la rizósfera de las plantas de café var Marsellesa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio, muestreo de suelo rizosférico y conservación de la muestra. El muestreo se realizó en la finca Quimiapan, ubicada en la vereda La Estanzuela, Las Margaritas, 91637 Pacho Viejo, Veracruz, a una altitud de 1080 m (19° 28' 01.0" latitud norte y 96° 52' 36.0" longitud oeste). La finca cuenta con 4 años de establecido el cultivo de café de la variedad Marsellesa, en una parcela de 30.8 × 12 m (369.6 m²), se realizó un muestreo de 24 plantas (con una densidad de 0.065 plantas/m², con una cobertura por planta de 15.4 m² por planta) de un total de 132, con un tipo de suelo Andosol. De cada planta se recolectaron 500 g de suelo rizosférico (15 cm de profundidad), colocado en bolsas de polietileno, y transportado en hielera para su posterior procesamiento.

Aislamiento microbiano de la rizósfera de café. Se tomaron 10 g de suelo rizosférico de cada una de las 24 muestras y se homogeneizaron. De esta mezcla, se prepararon diluciones seriadas de 10^{-2} hasta 10^{-4}. Se sembraron 100 µL de cada dilución en cajas Petri con medio de cultivo, con tres repeticiones, e incubaron a 27 °C por 72 h para el conteo de unidades formadoras de colonias (UFC) a las 24, 48 y 72 h. Se usaron agar nutritivo (Beltrán Pineda *et al*., 2017) y medios específicos como Rennie (Hernández *et al*., 2003) y Rodríguez (Rodríguez-Cáceres, 1982). Las colonias obtenidas se purificaron para su caracterización.

Pruebas de fijación de nitrógeno, solubilización de fosfatos y producción de AIA. Las cepas bacterianas purificadas fueron evaluadas mediante pruebas bioquímicas para determinar su función. La potencial capacidad biológica de fijación biológica de nitrógeno (FBN) (Córdova-Rodríguez *et al*., 2022) se evaluó incubando las cepas en tubos con medio semisólido específico a 28 °C por 15 días, y registrando el cambio de coloración azul (Di Salvo y García, 2019). Para índoles totales, se utilizó medio de cultivo líquido YMA (Criollo-Campos *et al*., 2021). En una microplaca se colocaron 100 µL del medio por triplicado, por 48 h; y se añadieron 100 µL de reactivo de Salkowski en cada pozo (incubando por 30 min) dando positivo al inducir coloración rojiza y rosa. La solubilización de fosfato (SF) se realizó en medio sólido Pikovskaya (Corrales Ramírez *et al*., 2014), a 28 °C por 15 días. La formación de halos de solubilización alrededor del crecimiento bacteriano se consideró como resultado positivo. Para la identificación molecular, se extrajo ADN por medio de la técnica CTAB al 2% (Doyle y Doyle, 1990). Para la identificación filogenética (máxima verosimilitud e inferencia bayesiana) se utilizó el software raxmlGUI (Silvestro y Michalak 2012) y MrBayes (Ronquist *et al*. 2012).

Análisis estadísticos. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar. Para evaluar las diferencias entre tratamientos, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía. Cuando se detectaron diferencias significativas, se utilizó la prueba de comparaciones múltiples (Tukey α=0.05). Los análisis estadísticos se realizaron en el programa R, versión 4.3.3.

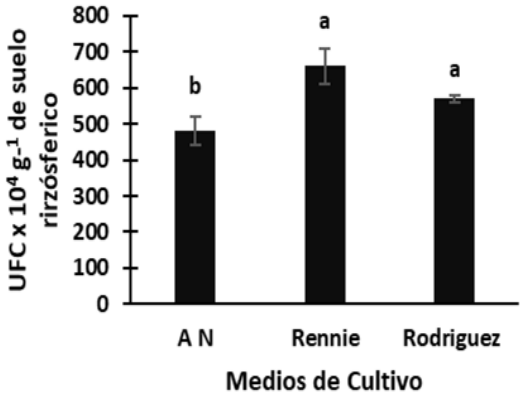
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El mayor número de UFC de bacterias cultivables se obtuvo en medio Rennie (660×10^4 UFC), mientras que el menor número se registró en el medio AN (480×10^4 UFC), mostrando diferencias significativas entre tratamientos (p=0.0046). Las bacterias obtenidas en medio Rennie (660.0 ± 52.9) y Rodríguez (573.3 ± 11.5) mostraron diferencias significativas contra Agar nutritivo (483.3 ± 41.6) (p=0.0015 y p=0.0314, respectivamente). No hubo diferencias entre los medios Rennie y Rodríguez (Figura 1).

Se aislaron e identificaron molecularmente 55 cepas, de las cuales 43 dieron positivo a AIA, 3 a solubilización de fosfatos y 32 a fijación de nitrógeno; de estas, destacaron 9 bacterias (Cuadro 1). Las cepas con mayor producción de AIA fueron *Delftia acidovorans CS10, Stenotrophomonas sp. CS35, Alcaligenes faecalis CS45, Pseudomonas putida CS58, Serratia marcescens CS76* y *Bacillus cereus CS60*. Las cepas más prominentes para fijar nitrógeno son *D. acidovorans CS10, Stenotrophomonas sp. CS35, A. faecalis CS45, P. putida CS58, Delftia tsuruhatensis CS15* y *S. marcescens CS76*. En la solubilización de fosfatos sobresalieron *P. putida CS58* y *Rhizobium rhizogenes CS41*. En general, *D. lacustris CS51, Stenotrophomonas sp. CS35* y *A. faecalis CS45* realizaron funciones simultáneas (AIA y FBN). De las 55 cepas, se identificaron 18 géneros y 30 especies: *Achromobacter sp. (CS84), Agrobacterium sp. (CS40), Agrobacterium tumafaciens CS62, Alcaligenes faecalis (CS45, CS55), Alcaligenes sp. (CS23.1), Bacillus aerophilus (CS91), Bacillus cereus (CS60), Bacillus thuringiensis (CS7.1, CS28), Brucella pseudogrignonensis (CS77, CS79, CS80), Brucella sp. (CS8), Ochrobactrum tritici (CS68,CS89), Delftia acidovorans CS10, Delftia lacustris (CS51, CS32, CS16, CS31,CS42,CS51), Delftia sp. CS46, Delftia tsuruhatensis (CS15, CS36.3), Kerstersia gyiorum CS49, Leucobacter komagatae (CS36.1,CS39.1), Lysinibacillus irui CS17, Microbacterium arthrosphaerae CS22, Paenibacillus lautus CS1, Peribacillus frigoritolerans CS70, Priestia megaterium CS24, Pseudomonas putida CS58* y *CS64, Pseudomonas sp. CS39.2, Rhizobium rhizogenes CS41, Serratia marcescens CS76* y *CS85*, *Stenotrophomonas sp. CS13.3, CS19, CS27* y *CS35, Streptomyces anulatus CS56.1, Streptomyces coelicoflavus CS20* y *Streptomyces genisteinicus CS57*. De estas bacterias sobresalieron *Delftia acidovorans CS10, D. tsuruhatensis CS15, D. lacustris CS51, Stenotrophomonas sp. CS35*, *Serratia marcescens CS76, Rhizobium rhizogenes CS41, Alcaligenes faecalis CS45* y *Bacillus cereus CS60* (Figura 1).

Delftia acidovorans ha sido aislada de la rizósfera del cultivo de papa (Gómez Gómez *et al*., 2022). Defant (2023) mencionó que *D. acidovorans* sintetiza AIA y promueve el crecimiento de maíz. *Stenotrophomonas* ha sido aislada de la rizósfera de jitomate (Franco, 2014) y sintetiza AIA (Liba *et al*., 2006). *Serratia marcescens*, aislada de jitomate (Rodríguez-Lemus *et al*., 2021), sintetiza AIA (Espinosa *et al*., 2024). *Delftia tsuruhatensis* aislada de pastos, fija nitrógeno atmosférico (Doncel Mestra *et al*., 2018). *Rhizobium rhizogenes* aislado de *Vicia villosa, Lupinus angustifolius* y *Lotus corniculatus* (Jorge Matos *et al*., 2024), induce

la formación de raíces, y se usa para transformar plantas (Wang *et al*., 2025). *Alcaligenes faecales* ha sido aislada de suelo y agua, puede ser oportunista para algunas plantas, y es dañina para humanos (Huang, 2020). *Delftia lacustris* aislada de suelos contaminados, aguas residuales y muestras clínicas, tiene actividades de biocontrol y promoción del crecimiento (Sharma *et al*., 2025), pero es patógena para humanos (Zhang *et al*., 2024).



Clave de Identificación	Taxonomía	Numero ID de Secuencia Gen bank	Grupos Fisiológicos			Tinción Gram	Similitud (%)
			Indoles	SF	FBN		
CS10	*Delftia acidovorans*	Sequence ID: MZ203703.1	++++	-	-	Negativa	99%
CS15	*Delftia tsuruhatensis*	Sequence ID: KC706668.1	-	-	++	Negativa	99%
CS35	*Stenotrophomonas sp.*	Sequence ID: HQ650231.1	++++	-	+	Negativa	95%
CS41	*Rhizobium rhizogenes*	Sequence ID: MZ298108.1	++	+	-	Negativo	100%
CS45	*Alcaligenes faecalis*	Sequence ID: KT216606.1	++++	-	++	Negativa	99%
CS51	*Delftia lacustris*	Sequence ID: CP065748.1	++	-	+	Negativa	99&
CS60	*Bacillus cereus*	Sequence ID: CP106675.1	++++	-	+	Positiva	99.7%
CS76	*Serratia marcescens*	Sequence ID: AP028592.1	+++	-	-	Negativa	99%

Figura 1. Unidades formadoras de colonias de bacterias cultivables totales detectadas en caulosfera de café Marsellesa, en los medios de cultivo agar nutritivo (AN), Rennie (R) y Rodríguez (Rg).

Letras diferentes sobre las barras indican diferencias significativas entre tratamientos (Tukey, α=0.05). Medias ± error estándar, n=3. Bacterias potenciales de rizosfera para el desarrollo biotecnológico tomando en consideración factores de funcionalidad para inoculantes microbianos.

Bacillus cereus coloniza suelo, aguas del océano y otros hábitats ecológicos y coexiste en tejidos vegetales, ya sea como comensalista o en simbiosis (Hu *et al*., 2017), genera biopelículas y ayuda a la biorremediación de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Ghosh *et al*., 2024).

CONCLUSIONES

Las bacterias identificadas en suelo rizosférico de café están adaptadas a diferentes suelos y cultivos, y poseen cualidades fisiológicas que son benéficas para las plantas; además, albergan microorganismos que interactúan con las raíces cuyas actividades fisiológicas (producir AIA y fijar nitrógeno atmosférico) son potencialmente benéficas. Las bacterias identificadas tienen potencial biotecnológico para mejorar la nutrición y el crecimiento de plantas de café.

BIBLIOGRAFÍA

Beltrán Pineda, M.E. (2014). Hongos solubilizadores de fosfato en suelo de páramo cultivado con papa (*Solanum tuberosum*). *Ciencia en Desarrollo*, 5(2), 145-154.

Corrales Ramirez, L.C., Arevalo Galvez, Z.Y. & Moreno Burbano, V.E. (2014). Solubilización de fosfatos: una función microbiana importante en el desarrollo vegetal. *Nova,* 12(21), 68-79.

Córdova-Rodríguez, A., Rentería-Martínez, M.E., López-Miranda, C.A., Guzmán-Ortíz, J.M. & Moreno- Salazar, S.F. (2022). Simple and sensitive spectrophotometric method for estimating the nitrogen- fixing capacity of bacterial cultures. *MethodsX,* 9, 101917.

Criollo-Campos, P.J., Pérez-Moncada, U.A., Estrada-Bonilla, G.A. & Buitrago, R.R.B. (2021). Colección de Microorganismos con Interés en Biofertilizantes (cmib). Conservación y manejo.

Di Salvo, L.P. & García de Salamone, I.E. (2019). Desarrollo de película típica en medio Nfb semisólido por *Azospirillum brasilense*. Revista argentina de microbiología, 51(2), 184-185.

Doncel Mestra, A.J. (2018). Bacterias endófitas con actividad promotoras de crecimiento aisladas de pasto colosuana en el municipio de corozal, departamento de Sucre–Colombia (Doctoral dissertation, Maestría en Educación).

Defant, H. (2023). Influência de consórcios bacterianos na promoção de crescimento de milho (*Zea mays*) (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Doyle, J.J. & Doyle, J.L. (1990). A rapid total DNA preparation procedure for fresh plant tissue. Focus 12: 13- 15.

Duong, B., Marraccini, P., Maeght, J.L., Vaast, P., Lebrun, M. & Duponnois, R. (2020). Coffee microbiota and its potential use in sustainable crop management. A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 607935.

Espinosa, A.T.M., Gálvez, D.T., Rendón, G.S., Rivera, J., Rodas, P.P., Varón, R.C. & Suárez-Barón, H. (2024). Biodisponibilidad del fósforo en la rizosfera de café y cultivos alimentarios por actividad bacteriana. *Temas Agrarios,* 29(1), 22-39.

Figueroa, H. E. & Pérez, S. F. (2016). La producción y el consumo del café. España: Editorial Escamilla Bouchan Imelda.

Fulthorpe, R., Martin, A.R. & Isaac, M.E. (2020). Root endophytes of coffee (Café arabigo): Variation across climatic gradients and relationships with functional traits. *Phytobiomes Journal,* 4(1), 27-39.

Franco, G.M.R. (2014). Obtención y evaluación de un preparado líquido como promotor del crecimiento de cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) empleando la bacteria *Gluconacetobacter diazotrophicus*. Tesis doctoral, Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.

Ghosh, B., Dhar, J., Mukhopadhyay, M. & Bhattacharya, D. (2024). *Bacillus cereus* biofilm: Implications for food and diseases. *The Microbe,* 100129.

Gómez Gómez, A.M. (2022). Degradación del insecticida clorpirifos por *Pseudomonas aeruginosa*, rizobacteria aislada de cultivo de papa (*Solanum tuberosum*). Universidad Antonio Nariño. Programa de Bioquímica. Facultad de Ciencias. Bogotá – Circunvalar.

Hernández, E., Ferrera-Cerrato, R. & Rodríguez, R. (2003). Bacterias de vida libre fijadoras de nitrógeno atmosférico en rizósfera de frijol contaminada con queroseno. *Terra Latinoamericana*, 21(1), 81-89.

Hu, Y.L., Chen, Y.F., Wang, Y.Y., Tang, S.L., Chen, S.Z. & Yan, S.(2017). *Bacillus cereus* endófito controla eficazmente *Meloidogyne incognita* en plantas de tomate mediante la rápida ocupación de la rizosfera y su acción repelente. *Plant Dis.* 101(3), 448-455, 10.1094/PDIS-06-16-0871-RE.

Huang, C. (2020). Extensively drug-resistant Alcaligenes faecalis infection. *BMC infectious diseases,* 20(1), 833.

Henderson, T.P. (2019). La roya y el futuro del café en Chiapas. *Revista Mexicana de Sociología,* 81(2):389-416.

Jorge-Matos, L. (2024). Aislamiento y caracterización de endosimbiontes nodulares de leguminosas autóctonas para la recuperación de suelos quemados. Trabajo fin de máster, Universidad de Salamanca. España.

Liba, C., Ferrana, F., Mantio, G., Garboggini, F., Albuquerque, R., Pavan, C., Ramos, P., Fhilho, M. & Barbosa H. (2006). Nitrogen fixing Chemo-organotrophic bacteria isolated from cyanobacteria-deprived lichens and their amino acids and phytohormones. *Journal of Applied Microbiology,* 101: 1076–1086.

Muñoz, K.A. (2024). Aislamiento, caracterización e identificación de bacterias con capacidad fijadora de nitrógeno atmosférico asociadas con la rizosfera de *Solanum tuberosum* L. Var. Superchola.

Prasetya, R.D., Walida, H., Dalimunthe, B.A., Rizal, K. (2023). Isolation and characterization of nitrogen fixing fungi from fruit and vegetable waste compost. *International Journal of Science, Technology & Management,* 4(4), 948-953.

Raa Del Carpio, S.B. (2018). Caracterización y conservación de metabolitos del cultivo de *Bacillus* sp en fermentación batch con capacidad promotora de crecimiento vegetal y biocontrol frente a *Rhizoctonia solani*. Universidad Católica de Santa María, Tesis Ingeniera Biotecnóloga.

Rodríguez-Cáceres, E.A. (1982). Improved medium for isolation of *Azospirillum* spp. Appl. *Environ. Microbiol*. 44: 990-991.

Rodríguez-Lemus, M.C., López Muraira, I.G., Gómez Leyva, J.F. (2021). Evaluación de rizobacterias promotoras de crecimiento vegetal aisladas de suelos salinos en el cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum*). *REPOSITORIO NACIONAL CONACYT,* 25(73), 31-36.

Ronquist, F., Teslenko, M., van der Mark, P., Ayres, D.L., Darling, A., Höhna, S., Larget, B., Liu, L., Suchard, M.A. & Huelsenbeck, J.P. (2012). MrBayes 3.2: Inferencia filogenética bayesiana eficiente y elección de modelo en un gran espacio de modelos. *Sistema. Biol*. 61:539-542.

Sánchez, R., González-Gaona, E., Padilla-Ramírez, J.S., Gallegos-Robles, M.Á., González-Salas, U., Gómez-Jaimes, R. & Lira-Ramos, K.V.D. (2024). Efectividad de cepas de *Trichoderma* spp., y *Lecanicillium* spp., en el control de la roya (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome) en el cultivo del café en Nayarit, México. *Biotecnia,* 26.

Santoyo, G., Orozco-Mosqueda, M.D.C. & Govindappa, M. (2012). Mechanisms of biocontrol and plant growth-promoting activity in soil bacterial species of *Bacillus* and *Pseudomonas*: A review. *Biocontrol Science and Technology*, 22 (8), 855-872. https://doi.org/10.1080/09583157.2012.694413.

Sharma, P., Pandey, R. & Chauhan, N.S. (2025). Assessing wheat growth promotion potential of *Delftia lacustris* strain NSC through genomic and physiological characterization. *bioRxiv,* 2025-02.

Silvestro, D. & Michalak, I. (2012). raxmlGUI: una interfaz gráfica para RAxML. Org. Diversos. *Evolución*, 12:335-337.

SAGARPA. (2016). Plan Integral de Atención al Café PIAC. Consultado en línea el 24 de marzo de 2019. https://amecafe.org.mx/wp-content/uploads/2016/10/3_procafe.pdf.

Wang, Y., Yang, X., Wang, W., Wang, Y., Chen, X., Wu, H. & Zhang, C. (2025). Efficient genetic transformation and gene editing of Chinese cabbage using *Agrobacterium rhizogenes*. *Plant Physiology,* 197(2), kiae543.

Zhang, L., Zhang, X., Bai, H., Li, T., Zhang, Z., Zong, X. & Fan, L. (2024). Characterization and genome analysis of the *Delftia lacustris* strain LzhVag01 isolated from vaginal discharge. *Current Microbiology,* 81(8), 232.

CARACTERIZACIÓN DE LA NEMATOFAUNA EN COSTRAS BIOLÓGICAS DEL SUELO EN SITIOS CON MANEJO EN UN SEMIDESIERTO MEXICANO

Karla García Sandoval[1]; Candis Daniela Ramírez Mondragón[1]; Jessica de Jesús Sosa Quintero[1]

[1] Laboratorio de Ecología, Unidad de Biotecnología y Prototipos, Facultad de Estudios Superiores Iztacala 54090, Tlalnepantla, México.

Correo autor de correspondencia: jessica_sosqui@comunidad.unam.mx

RESUMEN

Las costras biológicas del suelo (CBS) son comunidades estructuradas por líquenes, briófitas y cianobacterias que desempeñan múltiples funciones ecosistémicas. Las biocostras interactúan con otras comunidades en el suelo, ya que pueden ser el hábitat de nematodos, debido a las condiciones microclimáticas que generan. Estas dos comunidades edáficas son indicadores biológicos del cambio global. En la Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán, Puebla, las actividades de subsistencia como la agricultura y la extracción de recursos están modificando la estructura de las biocostras, aunque las funciones biogeoquímicas y de estabilidad del suelo no se ven alteradas por su manejo. Sin embargo, se desconoce el impacto que tiene en la interacción entre CBS y la nematofauna. Por ello, se describieron las comunidades de biocostras y nematodos para conocer cómo responden al manejo local. Si la estructura de las biocostras es diferente en los sitios de manejo, se espera que la comunidad de nematodos también lo sea. Para ello, se identificaron taxonómicamente y estimó la abundancia de CBS y nematofauna. La abundancia de líquenes disminuyó en los sitios con manejo en comparación con el sitio de referencia. Las cianobacterias, los musgos, la CBS total y los grupos tróficos de nematodos presentaron coberturas similares en los distintos sitios. Las actividades locales modifican la estructura de algunos grupos específicos de biocostras, pero no la de los nematodos. Esto sugiere que las actividades de subsistencia modifican la estructura de las biocostras, cambios que mantienen la abundancia de nematodos a pesar del manejo local.

PALABRAS CLAVE: *Actividades humanas; biocostras; interacciones; líquenes; nematodos.*

INTRODUCCIÓN

Las zonas áridas y semiáridas se caracterizan por condiciones limitantes en cuanto a agua, nutrientes y altas temperaturas, por lo que son zonas susceptibles a la perturbación provocada por factores climatológicos y/o actividades humanas, lo que genera cambios en las características del suelo (Reynolds y Smith, 2002). Para determinar el grado de perturbación del suelo existen indicadores físicos, químicos y biológicos (USDA, 1999). Entre los indicadores biológicos del suelo a nivel de comunidad se encuentran las costras

biológicas del suelo (CBS), también llamadas biocostras, así como la nematofauna (Belnap y Eldrige, 2001; Sánchez y Talavera, 2013).

Las CBS se constituyen principalmente por líquenes, briofitas y cianobacterias. Se trata de una comunidad diversa en estructura, con organismos altamente susceptibles y sensibles a los cambios en el entorno. Además, desempeñan múltiples funciones en el ecosistema, como la participación en procesos hidrológicos, biogeoquímicos, edáficos y ecológicos. Por lo tanto, se consideran un buen indicador del cambio global (Belnap y Eldridge, 2001). Mientras que los nematodos son esenciales en procesos ecológicos del suelo, tales como la dinámica de nutrientes, estabilidad del suelo y regulación de hongos, bacterias y cianobacterias en el suelo (Ferris, 2010).

En las zonas áridas y semiáridas, las CBS y la nematofauna son comunidades que interactúan entre ellas. Se ha documentado que las biocostras constituyen el hábitat de los nematodos, favoreciendo su abundancia, riqueza y diversidad en comparación con áreas desprovistas de biocostras (Miguel de la Cruz, 2013). Este fenómeno se atribuye a las condiciones microambientales potencialmente ideales de humedad, porosidad, temperatura y disponibilidad de nutrientes (Darby *et al*., 2009; Guan *et al*., 2020; Wang *et al*., 2024). Estos gusanos redondos no segmentados, que se desarrollan en la película de agua que rodea las partículas del suelo, poseen características que los convierten en buenos indicadores biológicos de calidad ambiental, debido a sus ciclos de vida cortos, lo que les permite responder rápidamente a cambios en el ambiente (Sánchez y Talavera, 2013).

Respecto a los grupos tróficos de nematodos asociados con biocostras, se han descrito cuatro: herbívoros, frugívoros, omnívoros, bacterívoros. Estos grupos se han documentado en zonas áridas y semiáridas templadas del mundo. Por ejemplo, en China y Estados Unidos, se ha demostrado que las biocostras dominadas por líquenes y musgos son fuente de alimentación y refugio a la nematofauna, favoreciendo su abundancia y riqueza (Wang *et al.,* 2024; Guan *et al.,* 2020; Darby *et al.,* 2007). En áreas áridas y semiáridas tropicales, se ha documentado que las biocostras constituidas por grupos taxonómicos de musgos, líquenes y cianobacterias, incrementan la disponibilidad de recursos para la nematofauna. Este estudio se realizó por Miguel de la Cruz (2013) en el Valle de Zapotitlán de Salinas, un sitio que se localiza en la Reserva de la Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán, en el estado de Puebla, México.

En el interior de la Reserva, se observan localidades donde predominan las biocostras y se realizan actividades humanas relacionadas con la agricultura y la extracción de recursos. Estas actividades han modificado la estructura taxonómica y funcional de las biocostras, lo que ha tenido un impacto en su participación dentro de los procesos hidrológicos y biogeoquímicos (Sosa-Quintero *et al.,* 2022a). Asimismo, se han observado cambios en su estructura, asociados con las funciones de transformación y retención de nitrógeno (N^{3-}) en el suelo, que son moduladas por las biocostras (Sosa-Quintero *et al.,* 2023). Por lo que resulta interesante evaluar cómo las actividades humanas tienen un efecto en la estructura de las biocostras y estimar si los cambios en estructura tienen un efecto en la abundancia de los nematodos, para conocer su participación como hábitat de microorganismos del suelo. Considerando lo anterior, se espera que las biocostras tengan

una composición específica en los sitios bajo cada tipo de actividad local, como sitios de riego para la agricultura, de ganadería y tiraderos de basura, y esto a su vez se vea reflejado en la nematofauna, específicamente en la abundancia de los grupos tróficos de los nematodos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se localiza en el municipio de Coxcatlán, perteneciente a la Reserva de Tehuacán-Cuicatlán, Puebla. Se seleccionaron cuatro unidades de manejo: 1) ganadería caprina trashumante, 2) canal de riego tradicional por agricultura de temporal, 3) barranca en la que se depositan residuos sólidos (tiradero de basura) y 4) selva (bosque tropical caducifolio y matorral xerófilo) sin perturbación (Rosas, 2003).

El muestreo de biocostras y suelo para la extracción de nematodos se realizó en mayo de 2024. En cada unidad de manejo se recolectaron seis muestras a lo largo en tres transectos de 20 m cada uno, en sitios con vegetación y sin vegetación, dando un total de 18 muestras por unidad de manejo. Para ello, se utilizaron nucleadores de cinco centímetros de diámetro por cinco centímetros de profundidad. En el laboratorio, las biocostras se determinaron taxonómicamente con claves especializadas para cada grupo taxonómico: para cianobacterias (Komárek, 2003), para líquenes (McCune y Rosentreter, 2007; Rosentreter *et al.,* 2007) y para las briófitas (Sharp *et al*., 1994). Además, se consultó la colección de biocostras del laboratorio de Ecología de la UBIPRO, FES Iztacala. Para la cobertura de los organismos pertenecientes a la biocostra se determinó a nivel de grupo taxonómico, mediante el método de punto transecto. Para ello, se utilizó un microscopio estereoscópico para la observación de las biocostras en cada núcleo. En estas, se instaló una rejilla de 10×10 cuadros, en los cuales se trazaron tres transectos. Posteriormente, se llevó a cabo el registro del grupo taxonómico (cianobacteria, liquen y/o briófita) en 10 puntos de cada transecto.

Para la extracción de nematodos, se recolectaron seis muestras de suelo compuestas (100 g) en cada transecto para cada unidad de manejo, dando un total de 24 muestras. Los nematodos del suelo se obtuvieron empleando el método de Baermann (1917). Los grupos tróficos se determinaron con base en la estructura bucal y del género-hábito alimenticio, como lo sugiere Yeates *et al.* (1993). Mientras que, para la identificación taxonómica a nivel de género se utilizó la guía virtual de la Universidad de California USA (Nemaplex). Finalmente, las especies de nematodos se clasificaron por grupo trófico y se determinó la abundancia de cada grupo por unidad de manejo y microambiente. Para conocer las diferencias en la abundancia de las biocostras, se realizó un análisis de varianza ANOVA y una prueba de Kruskal-Wallis.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Biocostras. Los resultados indican la presencia de: a) briofitas (8 especies): *Aloina hamulus, Brachymenium exile, Bryoerythrophyllum sp., Bryum argenteum, Didymodon rigidulus, Fissidens sp., Pseudocrossidium crinitum* y *Pseudocrossidium replicatum*; b) líquenes (10 especies): *Enchylium coccophorum, Endocarpon loscosii, Peltula patellata, Peltula euploca, Peltula sp., Peltula richardsii, Placidium lacinulatum, Placynthiella cf uliginosa, Polychidium*

dendriscum y *Psora crenata,* y c) cianobacterias (6 especies): *Chroococcidiopsis sp, Microcoleus vaginatus, Microseira sp., Nostoc sp., Schizothrix sp.* y *Scytonema hialinum*. Las biocostras del presente estudio, presentan especies similares reportadas en el estudio de Rivera *et al*., 2006 en otra localidad dentro de la Reserva, en Zapotitlán Salinas Puebla, donde se describió por primera vez a las CBS en un semidesierto tropical.

Respecto a la cobertura de los grupos taxonómicos de la biocostra, tanto en espacios libres de vegetación como bajo ella, en las cuatro unidades de manejo, las biocostras están dominadas por entre 50 y 70% de cianobacterias, entre el 10 y 30 % de líquenes y en menor porcentaje por briófitas. Los resultados del ANOVA indican que las coberturas de cianobacterias, de briófitas y el total de CBS fueron similares entre los distintos sitios ($p > 0.05$). Sin embargo, se observó una disminución de la cobertura de líquenes en las unidades de manejo de ganadería, riego y tiradero de basura ($p > 0.033$) en comparación con la unidad de selva (sin manejo). Este hallazgo puede estar relacionado con el impacto de la extracción de leña y la agricultura de temporal, dos actividades de subsistencia que modifican la estructura de las biocostras dentro de la Reserva, lo que indica que los líquenes son el grupo taxonómico que experimenta un cambio en su abundancia respecto al manejo (Sosa-Quintero *et al*., 2022b).

Nematodos. Se identificaron seis grupos tróficos con: 14 especies de bacterívoros, 5 de ectoparásitos, 1 de endoparásitos, 9 de fungívoros, 11 de omnívoros y 6 de depredadores. Es importante destacar que ningún género estuvo presente en todos los sitios evaluados. Respecto a la abundancia entre los sitios, esta fue similar entre el manejo y el sitio conservado, así como en los dos microambientes ($p > 0.05$). Los grupos tróficos de los nematodos exhiben una presencia notable de manera similar en las diferentes unidades de manejo, lo que sugiere que las biocostras podrían estar contribuyendo a la preservación de las comunidades de nematodos ante los efectos negativos del manejo local, proporcionando así un hábitat propicio para la nematofauna (Darby *et al*., 2007). En respuesta a las actividades pasivas locales dentro de la Reserva, las biocostras experimentan alteraciones en la estructura de los grupos taxonómicos, pero mantienen las funciones en el sistema (Sosa-Quintero *et al*., 2022a), principalmente como hábitat para la nematofauna.

CONCLUSIONES

En San Rafael Coxcatlán, las biocostras están dominadas por cianobacterias, líquenes y en menor proporción por briófitas. El impacto de las actividades locales, como la ganadería y agricultura, modifica la cobertura a nivel de grupo taxonómico; específicamente para los líquenes. A pesar de los cambios puntuales en la estructura de las biocostras, la abundancia de nematodos no se ve afectada, por lo que las biocostras podrían estar manteniendo la función de ser un hábitat idóneo para la nematofauna en esta zona semiárida tropical del centro de México.

BIBLIOGRAFIA

Baermann, G. (1917). Eine einfache Methode zur Auffindung von Ankylostomum (Nematoden) larven in Erdproben. *Geneeskundig Tijdschrift voor Nederlandsch Indië.* 57, 131-137.

Belnap, J. & Eldridge, D. (2001). Disturbance and Recovery of Biological Soil Crusts. In: Belnap, J., Lange, O.L. (eds.) Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management. *Ecological Studies*, 150. Springer, Berlin, Heidelberg.

Darby, B., Neher, D. & Belnap, J. (2007). Soil nematode communities are ecologically more mature beneath late than early-successional stage biological soil crusts. *Applied Soil Ecology*, 35(1), 203-212.

Darby, B., Neher, D. & Belnap, J. (2009). Impact of biological soil crusts and desert plants on soil microfaunal community composition. *Plant and Soil,* 328, 421-431.

Department of Entomology and Nematology, University of California. (1999). Nemaplex. http://nemaplex.ucdavis.edu/.

Ferris, H. (2010). Contribution of nematodes to the structure and function of the soil food web. *Journal of Nematology*. 42(1):63–67

Guan, P., Zhang, X., Cheng, Y., Zheng, H. & Liang, W. (2020). Biocrust regulates the effects of water and temperature on soil microbial and nematode communities in a semiarid ecosystem. *Land Degrad Dev*. 31, 1335–1343.

Komárek, J. (2003*).* Coccoid and colonial Cyanobacteria. In: Wehr, J.D. & R.G. Sheath, (eds.), Freshwater algae of North America. *Ecology and classification*. San Diego: Academic Press. p.p. 59-116

McCune, B. & Rosentreter, R. (2007). Biotic soil crust lichens of the Columbia River Basin. In: Monographs in North American Lichenology. 1. Northwest Lichenologists, Corvallis, OR, pp. 1e105.

Miguel de la Cruz, J. (2013). *Fauna de costras biológicas y suelo de islas de recursos formadas por Mimosa luisana, en el Valle de Zapotitlán Salinas, Puebla, México.* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México. TESIUNAM: http://132.248.9.195/ptd2013/mayo/0692130/0692130.pdf

Reynolds, J. & Smith, D. (2002). Do humans cause desertification? *Journal of Arid Environments, 51*(3), 371-388.

Rivera, V., Montejano, G., Rodríguez, S. y Durán, A. (2006). Distribution and composition of cyanobacteria, mosses and lichens of the biological soil crusts of the Tehuacán Valley, Puebla, México. *Journal of Arid Environment* 67, 208-225.

Rosas, R. (2003). *Estudio etnobotánico de San Rafael-Coxcatlán.* [Tesis de Licenciatura]. Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Universidad Nacional Autónoma de México. TESIUNAM: https://tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx/ptd2014/anteriores/microformas/0317612/Index.html

Rosentreter, R., Bowker, M. & Belnap, J. (2007). *A field guide to biological soil crust of Western U.S. drylands*. U.S. Government Printing Office, Denver, Colorado.

Sánchez, S. & Talavera, M. (2013). Los nematodos como indicadores ambientales en agroecosistemas. *Ecosistemas 22*(1), 50-55.

Sharp, A., Crum, H. & Eckel P. (1994). The moss flora of Mexico. Memoirs of the *New York Botanical Garden.* 69:1-1113.

Sosa-Quintero, J., Camargo, S., Herrera, M., y Godínez, H. (2022b). Rainfed agriculture and firewood extraction modify differently the taxonomic and functional structure of biocrusts in a tropical semiarid region. *Geoderma*. 406.

Sosa-Quintero, J., García, F. & Godínez, H. (2023). Rainfed agriculture and firewood extraction have contrasting changes on biocrust functional groups and soil N dynamics in a tropical dryland. *Journal of Arid Environments*. 208, 104882.

Sosa-Quintero, J., Godínez, H., Camargo, S., Gutiérrez, M., Huber, E., Jiménez, A., Maya, M., Mendoza, D., Manuel, N., Pando M., y Rivera, V. (2022a). Biocrusts in Mexican deserts and semideserts: A review of their species composition, ecology, and ecosystem function. *Journal of Arid Environments*. 199, 104712.

USDA NRCS. (1999). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio de Conservación de Recursos Naturales. https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/202210/Gu%C3%ADa%20para%20la%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20y%20Salud%20del%20Suelo.pdf

Wang, Y., Xiao, B., Wang, W., Saéz, T. & Delgado, M. (2024). Cyanobacterial and moss biocrusts shape soil nematode community in dryland mountain ecosystems with increasing aridity. *Sci Total Environ*. 25, 931-172750.

Yeates, G., Bongers, T., De Goede, R., Freckman, D. & Georgieva, S. (1993). Feeding habits in soil nematode families and genera - an outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*. 25, 315–331.

BIOSÓLIDOS, UNA ALTERNATIVA AGROECOLÓGICA EN EL CULTIVO DE GARBANZO

Martha Lidia Gutiérrez Pérez[1]; Luisa Fernanda Madrigales Reátiga[2]; Talia Fernanda Martínez Bastidas[1]; Pedro Alberto Rojas Rojas[1]

[1] Universidad Tecnológica de Culiacán. Carr. A Imala Km. 2.5, Culiacán, Sinaloa, México. C.P. 80014.
[2] Universidad Autónoma de Sinaloa.Facultad de Ciencias Químico-Biológicas (FCQB). Calzada de las Américas Nte, 2771, C U, Burócrata, Culiacán, Sinaloa, México. C. P. 80030.

Correo del autor de correspondencia: ingpedro_rojas@hotmail.com

RESUMEN

El garbanzo es una opción en tiempos de sequía, pero la fertilización es la base del rendimiento y sostenibilidad, en este trabajo se comparó diferentes fuentes y dosis de fertilización para evaluar el rendimiento, características agronómicas del cultivo, concentración de iones y grados brix en la savia del tejido vegetal, se utilizó un diseño experimental de cuadrado latino con seis repeticiones. Los resultados mostraron diferencias significativas entre tratamientos, destacando el tratamiento mixto de fertilizante orgánico y sintético con el mayor rendimiento (2.1 Mg ha^{-1}), mientras que el sintético de dosis baja obtuvo el menor rendimiento (1.4 Mg ha^{-1}). La aplicación de lombricomposta y biosólidos demostró ser efectiva para mejorar el rendimiento y el crecimiento de las plantas, adicionada con aportes de nitrógeno menores a los recomendados, los grados Brix presentaron la mayor concentración en los tratamientos de menor rendimiento, y en tratamientos con alto rendimiento hubo menor concentración de azúcares. Esto coincide con estudios en otros cultivos, donde menores concentraciones de azúcares mostraron mejores rendimientos. En la concentración de iones en la savia, la mayor concentración de NO3 coincide con menores rendimientos. Esto sugiere que los biosólidos promueven una mayor eficiencia, mientras que (Ca^{2+}) tuvo una reacción opuesta. La aplicación mixta es una alternativa viable para un manejo integral y reducir el impacto ambiental e incrementar rendimientos.

PALABRAS CLAVE: *Azúcares; biofertilizantes; sequía.*

INTRODUCCIÓN

El garbanzo (*Cicer arietinum* L.) es un cultivo de importancia en la región de Sinaloa, México, debido a su alto valor nutricional y su capacidad de adaptación a condiciones climáticas adversas, es considerado cultivo de baja demanda de agua, muy común en tiempos de sequía, sin embargo, su manejo de fertilización es factor clave para garantizar un buen rendimiento agrícola y la sostenibilidad de la producción (Robles-Hernández *et al*., 2009). En este contexto, la aplicación de distintas fuentes de fertilización, tanto orgánicas (Gutiérrez-Coronado *et al*., 2014) como sintéticas, influyen significativamente en el crecimiento y productividad del cultivo de garbanzo (Apáez Barrios *et al*., 2015). Por otra parte, la fertilización excesiva puede provocar salinización y contaminación. así mismo un desequilibrio de los niveles de fertilidad, que puede provocar falta de fertilidad

de suelos, una opción de remediación puede ser la utilización de residuos orgánicos como compostas producidas en forma de biosólidos (Flores-Félix *et al*., 2014) en las plantas tratadoras de aguas residuales que forman parte de los sistemas municipales. Negrín-Brito y Jiménez-Peña (2012) mencionan que son muestras orgánicas alternativas como insumo orgánico. Los biosólidos contienen un alto contenido de nutrientes para plantas y organismos del suelo para el enriquecimiento de este, reportan que el uso de biosólidos aumenta la materia orgánica, disminuye la densidad aparente, aumenta los poros del suelo y aumenta la fertilidad por la aportación de nitrógeno y fósforo principalmente (Ozores y Méndez, 2013). Es por ello que el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto en el rendimiento del cultivo de garbanzo tratado con diferentes fuentes de nitrógeno para evaluar los indicadores de crecimiento y concentraciones de iones en el cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El establecimiento del cultivo se realizó en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Culiacán, Sinaloa, en el campo experimental sobre una superficie de 0-40-00 h, ubicado en el Km 2 de la carretera a Culiacán-Imala con las coordenadas 24º 86' 21'' N y 107º 34' 51'' W, y una altura de 58 msnm. La semilla que se utilizó fue garbanzo de la variedad Blanco Sinaloa, la siembra se llevó a cabo con una sembradora mecánica de labranza de conservación marca FAMAQ serie SLT-20. La fecha de siembra fue el 23 de octubre de 2024. En surcos dobles hilera 1.6 m. Para el control de malezas se aplicó "Metolaclor", herbicida preemergente para proteger el cultivo los primeros 30 días después de que nazcan las plantas. Posteriormente se deshierbo en forma manual con azadón y con aplicación de herbicidas de contacto "paraquat" dirigido a las malezas para evitar hospederos de plagas y enfermedades. Manejo de riego, por su característica de baja demanda de agua y sensibilidad al exceso, se realizó un análisis de suelos para determinar la textura de suelos, y contenido volumétrico por aplicar en cada riego. El monitoreo de riego fue previo a las etapas de desarrollo vegetativo, floración y la llenado de vaina. Se aplicó un riego previo a cada etapa por medio de un sistema de riego por goteo. Los tratamientos fueron tres fuentes de fertilizantes (orgánico, sintético y mixto) y dos dosis de nitrógeno: 75 y 150, unidades de nitrógeno (UN) (Rojas-Rojas *et al*., 2024): #1 Bio, 150 UN, que corresponde a la aplicación de 10 t ha^{-1} de biosólidos provenientes de la planta de aguas residuales de JAPAC, #2 Lomb, 75 UN, que corresponde a la aplicación de 10 t ha^{-1} de lombricomposta producida en las instalaciones de la universidad tecnológica de Culiacán, #3 Quim-B, 150 UN, que corresponde a la combinación de aplicar 75 kg de nitrógeno ha^{-1} en forma de urea más 5 t ha^{-1} de biosólidos provenientes de la planta de aguas residuales de JAPAC, #4 Quim, 150 UN, que corresponde a la aplicación 150 kg de nitrógeno ha^{-1} en forma de urea, #5 Quim-L, 75 UN, que corresponde a la combinación de aplicar 37.5 kg de nitrógeno ha^{-1} en forma de urea más 5 t ha^{-1} de lombricomposta producida en las instalaciones de la universidad tecnológica de Culiacán, #6 Test, que corresponde a la aplicación de 75 kg de nitrógeno ha^{-1} en forma de urea (Cuadro 1).

Cuadro 1. Tratamientos de fertilización de garbanzo por fuente de origen y dosis de nitrógeno.

Tratamiento	Fuente	Unidades nitrógeno
1 Biosólido (Bio)	orgánica	150
2 Lombricomposta (Lomb)	orgánica	75
3 Químico+Biosólido (Quim-B)	mixta	150
4 Químico (Quim)	sintética	150
5 Químico+Lombricomposta (Quim-L)	mixta	75
6 Testigo (Test)	sintética	75

Para el control de plagas y enfermedades se aplicó en etapa de desarrollo vegetativo una dosis de *acetamiprid* como insecticida en combinación con *captan* para las principales plagas y enfermedades. La cosecha se realizó en dos fases: arranque de planta por tratamientos y evaluación de granos, esta inició al presentarse la madurez fisiológica de la planta. El corte se realizó en forma manual, las variables a estudiar fueron rendimiento de grano "Rend" Número de vainas por planta "Cpz", se contaron y pesaron con una báscula gramera, la suma de vainas por planta, parámetros de crecimiento como altura de planta "Alt", de la misma planta colectada se midió en la mesa de trabajo con un flexómetro la distancia de la base de la corona de raíz a la parte más distal del punto de crecimiento, el grosor de tallo "GT" se midió con un vernier digital en la base del tallo 2 cm arriba de la corona y antes de la bifurcación, el peso fresco por planta "PPl" se obtuvo de la planta completa en una báscula gramera, la concentración de iones se obtuvo de la savia del tejido vegetal, por medio de los ionómeros marca Horiba(R): para medir niveles de nitratos "NO_3", niveles de calcio "Ca^{2+}", conductividad eléctrica "C.E.", potencial de hidrógeno "pH", niveles de sodio "Na^{+}" y azúcares en forma de grados brix "°Brix" (Gualavisí, 2014) (Cuadro 2).

El experimento se basó en el diseño cuadrado latino con seis tratamientos y seis repeticiones. Los tratamientos con fertilizantes se aplicaron en diferentes dosis (Cuadro 1), un total de 30 unidades experimentales con dos bloques por tratamiento, donde cada unidad experimental consistió en 5 camas dobles de 5 m de longitud para un total de 1,600 m lineales de surco. Los factores y niveles para evaluar fueron dos niveles de nitrógeno (150, 75 kg h^{-1}) y tres fuentes de origen de nutrientes, orgánicas, sintéticas y mixtas, para las operaciones estadísticas se utilizó el paquete MiniTab 17. El manejo convencional indica 150 unidades de nitrógeno, aplicados en la marca un 50% kg de N h^{-1}, a los 30 días de la siembra se complementó con 25% de N (durante el desarrollo vegetativo) y los restantes 25% de N en llenado de vaina, la fuente de nitrógeno fue urea (N 46%). El manejo de lombricomposta y biosólidos correspondió a la incorporación de 5 y 10 t h^{-1}, la cual, como fuente de nitrógeno, aportó al momento de la marca 75 y 150 kg de N h^{-1}, con el mismo criterio de dosificación del manejo convencional (Apáez Barrios *et al*., 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento. Con relación al rendimiento se obtuvieron diferencias significativas (P£ 0.05) entre tratamientos, el tratamiento Quim-L en primer lugar con un rendimiento de 2.1 Mg ha^{-1}, y por último el testigo con 1.4 Mg ha^{-1} (Figura 1-a). Resultados similares se obtuvieron al aplicar una composta en cultivo de frijol (Gutiérrez-Coronado *et al*., 2014). Al agregar lombricomposta a cultivos de granos, el rendimiento es significativo y crecimiento de las plantas (Robles-Hernández *et al*., 2009). Esto puede explicar en gran medida los rendimientos alcanzados a pesar de que el aporte de N fue menor a los 150 kg ha^{-1} recomendados por Apáez Barrios *et al*. (2020) como el mejor tratamiento en garbanzo.

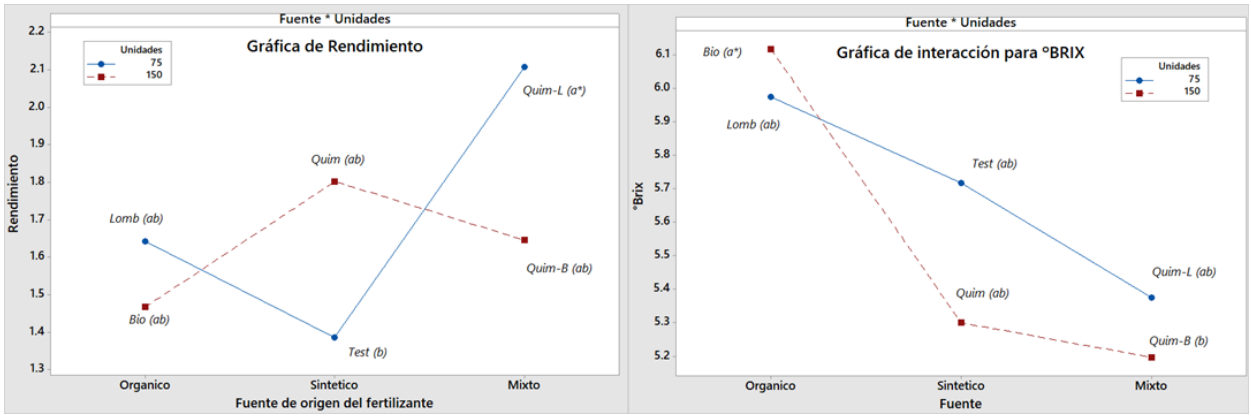


Figura 1. Gráficas de interacción de experimento con garbanzo: (a) muestra la interacción del rendimiento con diferencia significativa por origen del fertilizante en la dosis de 150 unidades mixto "Quim-L; (b) muestra la interacción de los grados brix con diferencia significativa por origen del fertilizante en la dosis de 75 unidades orgánico "Quim-B"

En otro trabajo Apáez Barrios *et al*., (2015) encontraron un aumento en rendimiento de suelos diferentes y dosis de nitrógeno en cultivos de garbanzo. Además, se encontró que el número de vainas por planta, el peso de 100 granos y el rendimiento aumentaron en la concentración de nitrógeno aplicado. En ese sentido otro trabajo de frijol aplicado con 9 ton de biosólidos por hectárea obtuvo rendimientos del triple que el testigo (Negrín-Brito y Jiménez-Peña, 2012). En contraste en un trabajo con judías, el rendimiento mejoró cuando se aumentó la proporción de compost del 25 al 50%, pero la adición de fertilizante no tuvo un efecto significativo en el rendimiento total, así mismo contrasto la acelga, la cual con la aplicación de compost tuvo un efecto negativo en el rendimiento de la judía común, especialmente cuando aumentó al 50% y cuando se añadió fertilizante (Smith *et al*., 2001) (Cuadro 1).

Grados Brix. En relación a los azúcares en el tejido vegetal de la planta medidos en grados brix, se obtuvieron diferencias significativas (P£ 0.05), el mayor contenido fue en el tratamiento aplicado con biosólidos "Bio", y la menor concentración en el tratamiento Quim-B cuyo resultado fue de los mayores rendimientos e indicadores de crecimiento, estos datos coinciden los resultados de un trabajo en pimientos que la Dosis baja de

potasio y media de calcio fueron los mejores rendimientos y eso indujo una menor concentración de azúcares en la savia de la planta (Rojas-Rojas *et al*., 2024). Asimismo, en otro trabajo de zacates ryegrass para el ganado se midieron los grados Brix y determinaron que estos influyen la aparición del número de hojas del pasto, más jóvenes y tienen más baja cantidad de sólidos solubles que las hojas maduras, así mismo en la mañana presenta un porcentaje bajo de Grados Brix, en la tarde los niveles de Grados Brix son más altos (Gualavisí, 2014) (Cuadro 2).

Peso fresco de planta. En la mezcla de tierra y compost superaron al suelo, produjeron la mayor masa total de hojas frescas, los rendimientos coinciden con Smith *et al*. (2001), quienes aumentaron significativamente con compost (149% para rábano y 50% para frijol). Se obtuvo una respuesta positiva en los indicadores de crecimiento en ambos cultivos (34 a 48% para rábano y 21 a 67% para frijol, respectivamente). (Gómez-Álvarez *et al*., 2008).

Indicadores de crecimiento. En esta variable los análisis mostraron diferencias significativas (P£ 0.05) entre tratamientos. Observando 63 vainas por planta en el tratamiento Quim-L, seguido por los demás tratamientos con reducción significativa y el tratamiento testigo en menor número de todos. Esto coincide con un experimento con judía común abonada con compost y adición de fertilizante, que generó un mayor número de vainas (Smith *et al*., 2001). Asimismo, en otro trabajo la fertilización con compost mejoró las propiedades químicas del suelo, número de vainas, altura de plantas y ancho de hojas, datos estrechamente relacionados con el P disponible, Ca, K, CIC y la relación C/N en el suelo (Gómez-Álvarez *et al*., 2008).

Cuadro 2. Rendimiento, datos fenológicos, minerales y azúcares en los 6 tratamientos de garbanzo con biofertilizantes.

Trat.	Rend	Cpz	Alt	GT	PFPl	NO_3	Ca^{2+}	C.E.	pH	Na^+	°Brx
Bio	1.5a^{b}	58^{ab}	161^{ab}	19.8^{ab}	79.9^{a}	379^{a*}	155^{ab}	8.8^{ab}	1.7^{a}	709^{a}	6.1^{a*}
Lomb	1.6^{ab}	44^{b}	157^{b}	18.7^{ab}	60.1^{a}	357^{b}	140^{b}	8.3^{b}	1.9^{a}	1187^{a}	6.0^{ab}
Quim-B	1.6^{ab}	58^{ab}	161^{a}	20.4^{ab}	74.7^{a}	341^{bc}	140^{ab}	7.8^{ab}	1.5^{a}	1097^{a}	5.2^{c}
Quim	1.8^{ab}	55^{ab}	162^{ab}	21.1^{b}	94.6^{a*}	333^{c}	157^{a*}	8.9^{a*}	1.6^{a}	735^{a}	5.3^{bc}
Quim-L	2.1 a*	63 a*	169 a*	22.1 a*	103.2 b	367 b	149 ab	67.4 ab	1.6 a	1125 a	5.4 bc
Test.	1.4^{b}	57^{ab}	163^{ab}	19.3^{ab}	82.9^{a}	356^{b}	150^{ab}	8.2^{a}	1.6^{a}	808^{a}	5.7^{abc}

******significancia estadística a 5%,* letras ^{abc} muestran la diferencia entre los tratamientos de cada análisis. (Rend): Rendimiento de grano de garbanzo Mg ha^{-1}, (Cpz) número de cápsulas de garbanzo por muestreo, (Alt) medida fenológica de altura de planta en dm, (GT) medida fenológica de grosor de tallo en mm, (PFPl) peso fresco de planta sin hojas solo tallos en gr, (Ca^{2+}): lectura de mg L^{-1} de calcio en tejido vegetal, (NO_3) lectura en mg L^{-1} de nitratos en tejido vegetal, (C.E.) Conductividad eléctrica en tejido vegetal, (pH) potencial de hidrógeno tomado en muestra de tejido vegetal, (Na^+) Lectura de sodio en muestra de tejido vegetal y (°Brix) porcentaje de grados brix en tejido vegetal.

Concentración de iones. Los resultados de iones minerales analizados en la savia de la planta mostraron la mayor concentración en el tratamiento "Bio", que a su vez es el de menor rendimiento, coincide con Gutiérrez-Coronado *et al*. (2014), quienes concluyeron

que con abono de compostas se promueve una mayor eficiencia en el uso del nitrógeno. En contraste, el tratamiento con mayor aprovechamiento de calcio "Ca^{2+}" correspondió al de mayor rendimiento y "C.E." Lo anterior coincide con otro trabajo que al agregar lombricomposta a cultivos de garbanzo mostraron resultados de algunas proteínas (NO_3) y respuestas intracelulares asociadas al calcio (Robles-Hernández *et al*., 2009), pero contrasta con otro trabajo en garbanzo cuyos niveles de nitrógeno aplicados fueron proporcional al rendimiento (Apáez Barrios *et al*., 2020). En un trabajo con diferentes suelos mostró la misma respuesta a la dosis de nitrógeno con la influencia de la matriz de desarrollo (Apáez Barrios *et al*., 2015).

CONCLUSIONES

La combinación de fertilización orgánica (biosólidos, lombricomposta) y sintética (urea) optimizó el rendimiento y el desarrollo del garbanzo, aumentando el número de vainas y la producción de grano. Los fertilizantes orgánicos son una alternativa viable a los sintéticos, mejorando la calidad del suelo y la absorción de nutrientes sin afectar negativamente el crecimiento. Un manejo integral, que incluya control de malezas, plagas y riego adecuado, es esencial para maximizar el rendimiento y reducir el impacto ambiental. Por otro lado, la integración de prácticas sostenibles y un monitoreo eficiente permiten optimizar el uso de recursos en la producción agrícola.

BIBLIOGRAFÍA

Gutiérrez-Coronado, M.A. (2014). Efecto del abono de sustrato gastado de champiñón en el rendimiento de frijol Phaseolus vulgaris L. *Terra Latinoamericana,* 32(1), 69–76. Retrieved from

Robles-Hernández, L., González-Franco, A.C., Guy, S. O. & Chun, W. C. (2009). Factor de composta líquida: tratamiento a la semilla con un derivado biológico para incrementar la producción de garbanzo. Phyton (Buenos Aires), 78(2), 129-134.

Apáez-Barrios, M., Escalante-Estrada, J.A., Apáez-Barrios, P. & Álvarez-Hernández, J.C. (2020). Producción, crecimiento y calidad nutrimental del garbanzo en función del nitrógeno y fósforo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1273-1284.

Apáez-Barrios, M., Escalante-Estrada, J.A., Rodríguez-González, M. T. & Apáez Barrios, P. (2015). Rendimiento de garbanzo en función del tipo de suelo y niveles de nitrógeno. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2: 295-299.

Negrín-Brito, A. & Jiménez-Peña, Y. (2012). Evaluación del efecto agronómico del biosólido procedente de una planta de tratamiento por digestión anaerobia de residuales pecuarios en el cultivo del frijol (*Phaseolus vulgaris L). Cultivos Tropicales,* 33(2), 13-19.

Smith, D., Beharee, V. & Hughes, J. (2001). The effects of composts produced by a simple composting procedure on the yields of Swiss chard (Beta vulgaris L. var. flavescens) and common bean (*Phaseolus vulgaris* L. var. nanus*). Scientia Horticulturae,* 91:393-406.

Gómez-Álvarez, R., Lázaro-Jerónimo, G. & León-Nájera, J.A. (2008). Producción de frijol (Phaseolus vulgaris L.) y rábano (*Raphanus sativus* L.) en huertos biointensivos en el trópico húmedo de Tabasco. Universidad y ciencia, 24(1), 11-20.

Gualavisí, A.M. (2014). Determinación del valor nutritivo del Ray Grass perenne (*Lolium perenne*) destinado a la alimentación del ganado vacuno mediante la correlación entre grados Brix y digestibilidad Cayambe-Ecuador 2013 (Bachelor's thesis).

Rojas-Rojas, P., Parra-Terraza, S., Velarde-Félix, S. & Lightbourn, L. (2024). Influence of the K+ and Ca2+ on the Presence of Sugars in the Phloem, and Growth Parameters in Capsicum. *Sustainable Agriculture Research*, 7. 1-1.

Flores-Félix, E., Moreno-Casillas, H., Figueroa-Viramontes, U. & Potisek-Talavera, M.C. (2014). Disponibilidad de nitrógeno y desarrollo de avena forrajera (Avena sativa L.) con aplicación de biosólidos. Terra Latinoamericana, 32(2), 99-105.

Ozores-Hampton, M. & Méndez, J. (2013). Uso de biosólidos en producción de hortalizas. Universidad de Florida. IFAS. Extensión. Publicación HS 1183. Topics: Horticultural Sciences/Biosolids/Vegetable Productión.

CONTAMINACIÓN DE GLIFOSATO EN SUELOS CAÑEROS EN PASO DE OVEJAS, VERACRUZ

Ángel de Jesús Isidoro Pio[1]; Catalino Jorge López Collado[1]; María del Refugio Castañeda Chavez[2]; Eusebio Ortega Jiménez[1]; Gustavo López Romero[1]; Joel Velasco Velasco[3]

[1] Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, Carretera Federal Xalapa-Veracruz Km. 88.5, C.P. 91690, Tepetates, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México.
[2] Instituto Tecnológico de Boca del Río. Carretera Veracruz-Córdoba Km.12, C.P.94290. Boca del Río, Veracruz, México.
[3] Colegio de Postgraduados Campus Córdoba, Carretera Federal Córdoba-Veracruz km 348, C. P. 94953, Manuel León, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México.

Correo del autor de correspondencia: aisidorop@gmail.com

RESUMEN

El cultivo de caña de azúcar se ve inmerso en la utilización de aditamentos que contribuyan a mejorar la producción, como es el caso de herbicidas. En Veracruz, el glifosato es uno de los herbicidas más utilizados en la caña de azúcar; no obstante, la dependencia de este agroquímico es una amenaza no solo a la salud del suelo sino también a la salud ocupacional de los actores clave del cultivo. Debido a esto se evaluaron muestras de suelo de parcelas de caña de azúcar en la región de Paso de Ovejas, Veracruz, con el fin de identificar presencia de glifosato residual. Este análisis se realizó mediante la técnica ELISA. Se evaluaron parcelas en cinco localidades de la región, donde se determinó la presencia de glifosato residual. La concentración promedio identificada para las localidades evaluadas fue: Carretas (0.929 mg L^{-1}), El manantial (0.210 mg L^{-1}), La Víbora (0.747 mg L^{-1}), Tamarindos (1.425 mg L^{-1}) y Palmaritos (0.745 mg L^{-1}). Los datos obtenidos de las muestras analizadas muestran que existe un uso de herbicidas dependiente, lo cual refleja una práctica agronómica extendida en toda la región, evidenciando el riesgo ambiental y la exposición sanitaria.

PALABRAS CLAVE: *Residualidad de herbicidas; Contaminación del suelo; Manejo de herbicidas; Exposición; Riesgo ambiental.*

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es un cultivo que forma parte de las principales cadenas agroalimentarias mexicanas exportadas, siendo Veracruz uno de sus principales estados productores. Veracruz se ha destacado por ser el primer lugar en producción de este cultivo aportando más del 40 % de la producción nacional (SAGARPA, 2015). Entre las diferentes regiones que cultivan caña de azúcar se encentran los municipios que conforman el Distrito de Riego 035, los cuales forman redes de interacción con los ingenios de La Gloria y El Modelo, lo que lleva a los productores de la región a buscar mejores formas de producir *S. officinarum L.* Este cultivo es la principal fuente de ingresos para las familias de la región cañera, dado que es el principal

aportador económico, así como un fenómeno sociocultural que forma parte de la tradición agrícola (Hernández-Pérez *et al*., 2017).

No obstante, en afán de mejorar los rendimientos de producción se crean riesgos presentes en la multidimensionalidad de los cultivos, los cuales se ven inmersos en eventos multifactoriales. Como todo cultivo intensivo, la caña de azúcar se auxilia de diversos aditamentos que mejoren los procesos de desarrollo de las plantas, tal es el caso del uso de herbicidas. Y es que el uso de estos agroquímicos contrae riesgos no solo en la salud del suelo, sino que compromete la salud de las matrices ambientales del agua y el aire, poniendo en riesgo el ambiente natural y creando vulnerabilidad en los agroecosistemas, en caso particular el de caña de azúcar (Parven *et al*., 2025).

La permanencia del glifosato en suelos puede ser diversa según la diferente literatura, pero esta depende de factores del suelo como textura, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, entre otros (Borggaard y Gimsing, 2008). Asimismo, influyen factores climáticos como la precipitación, la temperatura, la humedad (Alonso *et al*., 2028). El factor humano también juega otro papel importante en la contaminación por glifosato en suelos, y es que las malas prácticas en el uso y aplicación de este herbicida pueden generar no solo residualidad en el ambiente, sino producir bioacumulación en otras matrices biológicas, considerando esto un problema de carácter sistémico. (Bai y Ogbourne, 2016). Una alta residualidad de glifosato en suelos afecta la calidad, la fertilidad y la dinámica microbiana, impactando negativamente en los rendimientos de producción.

El uso de herbicidas como el glifosato es considerado un riesgo no solo ambiental sino también en la salud de los actores involucrados en su uso y aplicación debido a la exposición. El glifosato es considerado en muchos sectores como un agroquímico controversial debido a las opiniones divididas que se presentan en torno a su uso. Lo anterior se respalda en investigaciones proporcionadas por la IARC (2006), clasificando al glifosato como un compuesto cancerígeno. En la región cañera de Veracruz, como Paso de Ovejas, pueden existir concentraciones residuales de glifosato en suelos, según lo informado por Ramírez-Mora *et al*., 2018.

Debido a lo anterior, el presente trabajo evaluó la contaminación residual de glifosato en muestras de suelo cultivado con caña de azúcar en el municipio de Paso de Ovejas, Veracruz, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El área de estudio fue el municipio de Paso de Ovejas, Veracruz, (19°17′, 96°26′) localizada en el Distrito de Riego 035. El clima es cálido-seco-regular, con una temperatura de 25 °C en promedio. Las localidades pertenecientes a esta región fueron Carretas (19°13′, 96°25′), El manantial (19°15′,96°26′), La Víbora (19°18′, 96°22′), Palmaritos (19°13′, 96°24′) y Tamarindo (19°19′, 96°24′).

Recolección y almacenamiento de muestras. Se muestrearon entre 1 y 1.5 kg de suelo de las parcelas de caña de azúcar a 30 cm de profundidad, debido a la consideración de la concentración residual se levantaron muestras en el interior de la parcela y en los bordes a éstas. Se recolectaron triplicados de cada sitio y se homogenizaron por zona de

levantamiento. Posteriormente se depositaron en bolsas y se refrigeraron a 4°C. Las muestras se cubrieron dentro de una bolsa negra para evitar la fotodegradación. Estas muestras se mantuvieron en refrigeración menos de 30 días para evitar degradación (NMX-132-SCFI-2006).

Pretratamiento. Las muestras fueron secadas a temperatura ambiente de 24 a 72 horas, posteriormente se limpiaron con el fin de remover materia como ramas, raíces, hojas, grava, entre otros, y se trituraron terrones. Se pesaron 100 g para posteriormente pasarlos por un tamiz de 25 mm y de este se pesaron 5 g para el pretratamiento. Esta muestra se diluyó con diluente del kit ELISA, se centrifugó y se extrajo en un vial para su posterior derivatización.

ELISA. Seguido del pretratamiento, se colocaron las muestras en los pocillos de la placa de la microtitulación para agregar los anticuerpos. Se dejó incubar 30 minutos, se adicionó conjugado enzimático, se incubó por 60 minutos; y se decantó para realizar un lavado por triplicado con la solución tampón de lavado. Al secarse los pocillos se adiciono la solución sustrato y se adicionó la solución tampón (Ácido sulfúrico 0.5 M). Se leyó por un lector Eurofins Abraxis 4303 a 450 nm (Eurofins, 2024).

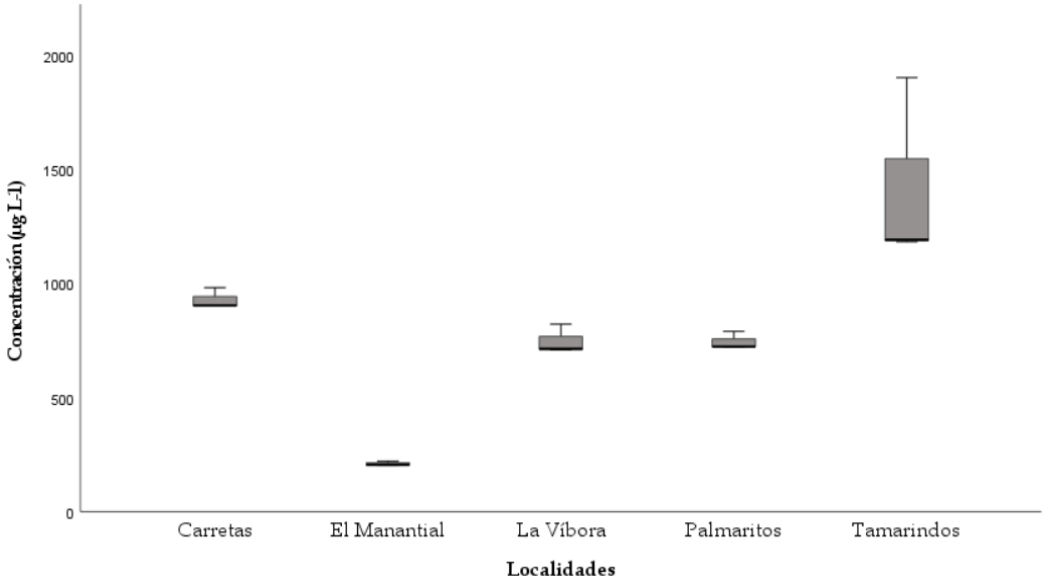
Análisis estadístico. Se aplicó un análisis de varianza ANOVA para determinar diferencias significativas ($p \leq 0.05$) y prueba de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las muestras recolectadas en las diferentes parcelas de caña de azúcar en la región de Paso de Ovejas, Veracruz, muestran presencia de glifosato en todas las áreas analizadas. Lo que nos indica la presencia de este agroquímico aun posterior a su uso. No existen estudios que evalúen la concentración residual por glifosato en la región de Paso de Ovejas, Veracruz, no obstante, según información presentada por Ramírez-Mora *et al.*, 2018, la región a la que pertenece, el Distrito de Riego 035, es un área dependiente del uso de plaguicidas entre los que destaca el glifosato. El glifosato tiene un tiempo de permanencia diferencial en el ambiente, no obstante, esta puede demorar desde días hasta años, esto dependiendo de diversos factores ambientales, climatológicos y relacionados con su uso. Las concentraciones promedio para estas muestras fueron: Carretas (0.929 mg L^{-1}), El manantial (0.210 mg L^{-1}), La Víbora (0.747 mg L^{-1}), Tamarindos (1.425 mg L^{-1}) y Palmaritos (0.745 mg L^{-1}). Las cinco localidades fueron estadísticamente diferentes ($p < 0.05$) con respecto a la concentración residual determinada. La Figura 1 resume las concentraciones en la región de estudio, en ella se puede observar que la distribución de concentración de glifosato en las réplicas fue mayor en la localidad de Tamarindo con valores por encima de 25 µg L^{-1}, límite máximo permisible en agua según la NOM-127-SSA1-2021, norma que establece los parámetros de referencia para agua de consumo, siendo el glifosato uno de los compuestos adheridos a los contaminantes dentro del grupo de los Compuestos orgánicos no halogenados. Se tomó de referencia esta norma ya que no existe una referencia normativa en el suelo a nivel nacional. A nivel internacional, la Agencia de Protección Ambiental emite los niveles de detección regional, los cuales son de 6,100 mg kg^{-1} para uso residencial y 62,000 mg kg^{-1} para uso industrial (EPA, 2025). La residualidad obtenida en las muestras de suelo es mucho menor que

especificada por la EPA, sin embargo, los datos determinados proporcionan una idea del alcance de la contaminación en el cultivo de caña de azúcar.

Figura 1. Concentraciones residuales de glifosato en suelos cañeros.



El glifosato es un compuesto que busca ser regulado debido a las implicaciones ambientales y sanitarias que conlleva su uso. La detección de glifosato en fase acuosa en muestras de suelo indica una potencial lixiviación hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneas, especialmente en suelos con alta permeabilidad o en temporadas de lluvia (Carretta *et al.,* 2022), así mismo se puede generar mayor retención en suelos de carácter arcillosos, como es el caso de los cultivos de Paso de Ovejas, Veracruz.

CONCLUSIONES

Las concentraciones de glifosato en suelo demuestran una práctica extendida dependiente del uso y manejo de herbicidas. Esta determinación indica que la contaminación por glifosato es de carácter sistémico y es considerada no solo un riesgo ambiental sino un potencial riesgo sanitario en la región. Este tipo de investigaciones reflejan la importancia de buscar alternativas y un control eficiente en el manejo de agroquímicos manejados en el cultivo de caña de azúcar.

AGRADECIMIENTOS

Laboratorio de Investigaciones de Recursos Acuáticos (LIRA) del Instituto Tecnológico de Boca del Río.

BIBLIOGRAFÍA

Alonso, L.L., Demetrio, P.M., Etchegoyen, M.A. & Marino, D.J. (2018). Glyphosate and atrazine in rainfall and soils in agroproductive areas of the Pampas region in Argentina. *Science of the Total Environment*, 645: 89-96. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.134.

Bai, S. H. & Ogbourne, S. M. (2016). Glyphosate: environmental contamination, toxicity and potential risks to human health via food contamination. *Environmental Science and Pollution Research*, 23: 18988-19001. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7425-3.

Borggaard, O. K. & Gimsing, A. L. (2008). Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: a review. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, 64: 441-456. https://doi.org/10.1002/ps.1512.

Carretta, L., Masin, R. & Zanin, G. (2022). Review of studies analysing glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) occurrence in groundwater. *Environmental Reviews*, 30(1): 88-109. https://doi.org/10.1139/er-2020-010.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). (2025). Regional Screening Levels (RSLs) generic tables. Accessed August 12, 2025, from https://epa-prgs.ornl.gov/cgi-bin/chemicals/csl_search

Eurofins. (2024). Glyphosate derivatization procedure 500205/500089. Eurofins. Accessed July 08, 2025, from https://www.goldstandarddiagnostics.com/pub/media/productattachments/files/fc-22-009-rev-01-glyphosate_500205_500089.pdf.

Hernández-Pérez, J.M., Landeros-Sánchez, C., Martínez-Dávila, J.P., López-Romero, G., Platas-Rosado, D.E. & Nikolskii-Gavrilov, I. (2017). Valoración de la evapotranspiración real estimada y rendimiento de caña de azúcar en Veracruz, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 8(5): 1013-1019. https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.104.

IARC. (2006). Data for the Monographs. Preamble to the IARC Monographs. World Health Organization (WHO), International Agency for Research on Cancer (IARC). https://monographs.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/06/SC2016-Poster-KGuyton.pdf.

NMX-132-SCFI-2006. (2006). Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra. Secretaría de Economía.

NOM-127-SSA1-2021. (2021). Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Secretaría de Salud.

Parven, A., Meftaul, I.M., Venkateswarlu, K. & Megharaj, M. (2025). Herbicides in modern sustainable agriculture: environmental fate, ecological implications, and human health concerns. *International Journal of Environmental Science and Technology,* 22(2): 1181-1202. https://doi.org/10.1007/s13762-024-05818-y.

Ramírez-Mora, E., Pérez-Vázquez, A., Landeros-Sánchez, C., Martínez-Dávila, J.P., Villanueva-Jiménez, J.A. & Lagunes-Espinoza, L.D.C. (2018). Uso histórico de plaguicidas en caña de azúcar del DR035 La Antigua, Veracruz. *Acta universitaria*, 28(4), 42-49. https://doi.org/10.15174/au.2018.1644.

SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2015). Veracruz primer productor de caña de azúcar. https://www.gob.mx/agricultura%7Cveracruz/articulos/veracruz-primer-productor-de-cana-de-azucar.

DIAGNÓSTICO DE CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO TULA Y LA PRESA ENDHÓ PARA RIEGO AGRÍCOLA

Hilda Ricela Jano Tolama[1,2*]; Anabella Handal Silva[1,2]; Arely Anaya Hernández[3]; José Víctor Rosendo Tamariz Flores[1,4]; Lucía López-Reyes[1,5]; Wendy Argelia García-Suastegui[1,2].

[1] Posgrado en Ciencias Ambientales, [2] Departamento de Biología y Toxicología de la Reproducción, [4] Centro de Investigación en Ciencias Agrícolas, [5] Centro de Investigación en Ciencias Microbiológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Boulevard. Valsequillo y Avenida San Claudio Edificio IC6, Ciudad Universitaria Colonia Jardines de San Manuel, 72570 Puebla, México.
[3] Centro de Investigación en Genética y Ambiente, Universidad Autónoma de Tlaxcala. Km 10.5 de la carretera San Martín Texmelucan S/N, san Felipe Ixtacuixtla, CP 90120, Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, Tlaxcala, México

Correo del autor de correspondencia: jt224570196@alm.buap.mx

RESUMEN

En Hidalgo, el uso de las descargas de aguas residuales provenientes de la CDMX, son transportadas por el Río Tula y almacenadas en la presa Endhó para ser utilizadas en la agricultura de riego. El estudio se llevó a cabo en el Río Tula y la presa Endhó, donde se seleccionaron 5 zonas de muestreo. Se evaluaron parámetros físico-químicos, DBO5, DQO, metales pesados y compuestos orgánicos volátiles (COVs). Los resultados demostraron que la temperatura del agua y ambiental, el pH y la CE se encuentran dentro de los límites máximos permitidos (LMP) de las normas NOM-001-SEMARNAT, CE-CCA y EPA. La DBO_5 y DQO superaron los LMP, de las normas, indicando alta carga de materia orgánica biodegradable y no biodegradable, lo que redujo el OD generando la formación de zonas anóxicas. Se determinaron siete metales pesados (Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn), As y CN, las mayores concentraciones se identificaron en la zona 1. Se reconocieron 14 COVs y sus concentraciones excedieron los LMP de la norma NMX-AA-103-SCFI, destacando la zona 3 con 11 COVs que sobrepasaron los LMP. Se registraron 23 contaminantes, de los cuales según la Agencia Internacional para la Investigación contra el Cáncer (IARC) tres metales pesados y cuatro COVs son cancerígenos y pertenecen al Grupo 1, un metal y un COV al Grupo 2A como probable cancerígeno y un metal y cinco COVs al grupo 2B como posibles cancerígenos. Estos resultados representan una amenaza a la seguridad alimentaria y posible riesgo a la salud humana.

PALABRAS CLAVE: *Agua residual; contaminación hídrica; Hidalgo; metales pesados.*

INTRODUCCIÓN

En México existen más de 50 Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESA), las cuales enfrentan un estrés sanitario y ambiental, generando graves impactos en la salud humana, los recursos naturales y el desarrollo social de las comunidades afectadas (Secretaría de Ciencia, 2023). A nivel nacional, la demanda de agua especialmente para la agricultura es cada vez mayor, lo cual impulsa un uso cada vez más frecuente de fuentes

de aguas no convencionales, como los efluentes urbanos tal es el caso, del Estado de Hidalgo, donde el uso de aguas residuales sin tratamiento previo, provenientes del Valle de México, ha contribuido al florecimiento del sector agrícola y ganadero permitiendo cultivos clave como maíz, alfalfa, frijol, avena, calabaza, tomate verde, tomate rojo, y una amplia gama de legumbres entre otros. Sin embargo, esta práctica también ha agravado problemas de rezago social y salud pública, principalmente en las poblaciones más vulnerables (Camacho, 2007).

En Hidalgo, el uso de las aguas residuales provenientes de la CDMX sin tratamiento previo, son transportadas por el Río Tula y almacenadas en la presa Endhó para posteriormente ser utilizadas en la agricultura de riego que puede tener tanto beneficios como riesgos, especialmente en términos de salud humana ya que llegan a contener metales pesados, los cuales pueden acumularse en los cultivos. Por lo que el objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad del agua del Río Tula y la Presa Endhó mediante las normas NOM-001, CE-CCA, NMX-AA-103 y la EPA.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el río Tula y la Presa Endhó localizadas en el Valle del Mezquital. Se seleccionaron cinco zonas de muestreo con base en la presencia de cultivo regados con agua del río Tula y/o la Presa Endhó, considerando además la accesibilidad, presencia de industrias, y población humana. En el municipio de Tula de Allende se ubicaron las zonas 1-4 y la zona 5 en el municipio de Tepetitlán. La toma de muestras fue por triplicado, en época de lluvias (septiembre-noviembre 2024). Fueron evaluadas las muestras de agua según la NOM-001-SEMARNAT-2021, CE-CCA, NMX-AA-103 y la EPA, 2012, que establecen LMP de contaminantes en las descargas de aguas residuales.

In situ se evaluaron temperatura del agua y ambiente, pH, conductividad eléctrica (CE) y oxígeno disuelto (OD) mediante un equipo portátil marca Conductronic modelo PC18. El OD se calculó por el método de Winkler, se utilizó un kit portátil marca HANNA, modelo HI 3810 Dissolve Oxigen. Para medir la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) se utilizó un incubador OxiTop Control OC 100, provistas de un sistema de medición manométrica de presión, en cada una de las tapas. La DQO se determinó con un kit Spectroquant de rango 25-1500 mg/L. La prueba se basó en el método de la determinación del cromo III y la oxidación del ácido cromosulfúrico.

La determinación de metales pesados (MP) se llevó a cabo según la norma NOM-001-SEMARNAT-2021, por espectrofotometría de absorción atómica (EAA) *SPECTRA 55B Varian* con mezcla de acetileno. La determinación de COVs se realizó según la NMX-AA-103-SCFI-2006, por cromatografía de gases acoplado a un espectrómetro de masas. Se utilizó una ANOVA para comparar la varianza entre las medias de los parámetros fisicoquímicos (DBO_5, DQO y O_2) y de los metales pesados en las diferentes muestras en cada zona de estudio y Kruskal-Wallis para los COVs.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En todas las zonas de muestreo se obtuvieron valores de pH entre 6 y 9 y dentro de los LMP de las normas: NOM-001 y EPA. La temperatura ambiental promedio fue de 25°C, mientras que la temperatura del agua en todas las zonas estuvo por debajo del LMP y fue de 35 °C. La CE osciló entre 1 ± 0.4 y 1.03 ± 0.38 mS cumpliendo con el LMP de 3.5 (mS). El oxígeno disuelto presentó concentraciones críticas (0.08 ± 0.11 - 0.7 ± 0.2 mg L^{-1}), muy inferiores a los rangos exigidos por la norma CE-CCA (5 – 6 mg L^{-1}). Estos niveles indican condiciones anóxicas, lo que indica una contaminación severa (Hernández-Acosta, 2011; Ahuactzi, 2025; Martínez-Tavera *et al*., 2018). La zona 4 destacó como el punto crítico cuyo valor fue de (0.08 ± 0.11 mg L^{-1}) al mismo tiempo que presentó gran cantidad de lirio acuático y la generación de malos olores asociados a subproductos anaeróbicos como metano y sulfuro de hidrógeno en las zonas 4 y 5 (Hernández-Acosta, 2011; SEMARNAT, 2020). Por otro lado, los niveles de DBO_5 en todas las zonas de estudio, se determinaron entre 32 ± 2.5 - 46.5 ± 7.50 mg L^{-1}y superaron los LMP establecidos por la NOM-001 (30 mg/L), CE-CCA (6 mg L^{-1}) y la EPA (≤ 10), mientras que los valores de DQO en las cinco zonas (122 ± 1.33 - 134 ± 10 mg L^{-1}) excedió los LMP de la NOM-001. Esta elevada carga de materia orgánica, que no se degrada por la ausencia de OD, sugiere pensar en las elevadas descargas domésticas, agrícolas e industriales, como señala Metcalf y Eddy (2014).

La contaminación industrial destacó como factor determinante: empresas como la refinería PEMEX Miguel Hidalgo, la termoeléctrica Francisco Pérez Ríos y las cementeras contribuyen con descargas de agua sin tratamiento adecuado previo (Gobierno de Hidalgo, 2018; INECC, 2021). Lo cual implica que el agua analizada en las cinco zonas de muestreo se determinaran siete metales pesados (Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn), As y CN que sobrepasaron los LMP de las normas NOM-001, CE-CCA y EPA (Figura 1), los cuales son elementos químicos que poseen un alto potencial de peligrosidad para el ambiente y los seres vivos, debido a que son tóxicos, según la IARC de estos nueve elementos, tres (Cd, Cr, As) pertenecen al Grupo 1 como cancerígenos, uno (Pb) al Grupo 2A como probablemente cancerígeno y uno (Ni) al grupo 2B como posiblemente cancerígeno y se pueden bioacumular en la cadena trófica generando riesgos para la salud humana (ASTDR, 2019; Jaishankar *et al.*, 2014; Moreno, 2003). Presentaron diferencia significativa entre las cinco zonas de estudio respecto al Cu, Ni, Pb, Zn y CN mientras que el resto Cd, Cr, Hg y As no mostraron diferencias significativas. La mayor concentración se observó en la zona 1 y paulatinamente fue disminuyendo su concentración, este comportamiento podría deberse a procesos naturales y antrópicos (Alloway, 2013; Buffle y Leppard, 1995; Stumm y Morgan, 1996). La zona 5 destacó por la alta concentración de Cr, Hg, Ni debido a la crecida del río que provocó que se arrastraran sedimentos contaminados históricamente de hace más de 70 años (Warren y Haack, 2001). De acuerdo con Hernández-Acosta (2011) el Hg, Pb, Cd no fueron detectados en las aguas de la zona de Tulancingo al igual que Siebe (1994) reportó valores bajos para esos mismo más Cu, Cr y Zn para el Distrito de Riego 03 En el presente estudio el Cd, Hg, Pb, Cu, Cr y Zn rebasaron 36%, 37%, 200%, 60%, 19% y 37% la NOM-001 respectivamente.

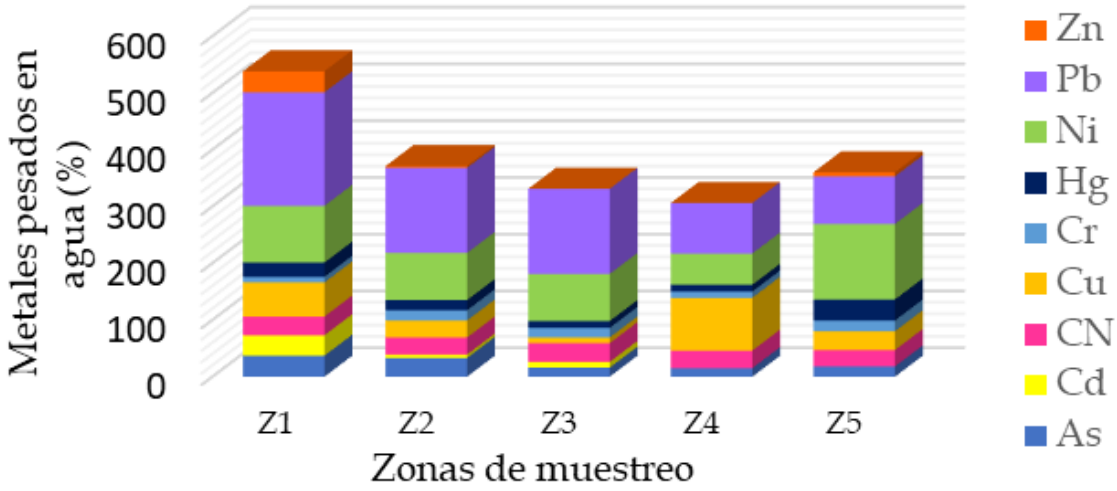


Figura 1. Concentración de metales pesados, arsénico y cianuro en el agua del Río Tula y la Presa Endhó.

El análisis de los COVs demostró la presencia de 14 compuestos (Benceno, Clorobenceno, Cloroformo, Cloruro de vinilo, 1,4-Diclorobenceno, 1,2-Dicloroetano, 1,2-Dicloroetileno, Hexaclorobenceno, Hexaclorobutadieno, Metil-etil-cetona, Piridina, Tetracloroetileno, Tetracloruro de carbono, Tricloroetileno), los cuales superaron los LMP de la NMX-AA-103 y CE-CCA. No hubo diferencias significativas entre las cinco zonas.

La zona 3 mostró altas concentraciones de COVs evidenciando una contaminación recurrente debido posiblemente a la presencia de una cloaca en la zona (Figura 2). Según Gunawardena *et al.* (2018), esto podría atribuirse a diferencias en la proximidad a fuentes emisoras y presencia de actividades industriales intensivas, lo que presenta un riesgo significativo para los ecosistemas acuáticos y la salud humana, especialmente donde es utilizada para riego (USEPA, 1986; ATSDR, 2019). De los 14 COVs identificados, cuatro (Benceno, Cloruro de Vinilo, Hexaclorobenceno, Tricloroetileno) son catalogados por la IARC como cancerígenos dentro del Grupo 1, uno (Tetracloroetileno) como probable cancerígeno y cinco (Cloroformo, 1,4-Diclorobenceno, 1,2-Dicloroetano, 1,2-Dicloroetileno, Tetracloruro de carbono) como posiblemente cancerígenos (ATSDR, 2019; IARC, 2018).

CONCLUSIONES

El estudio registró una mezcla de 23 sustancias químicas de preocupación ambiental y sanitaria; según la IARC son cancerígenos tres metales pesados y cuatro COVs, probablemente cancerígenos un metal pesado y un COV y posiblemente cancerígenos un metal pesado y cinco COVs. Estos hallazgos tienen importantes implicaciones para los usos del agua en la región. De acuerdo con los estándares establecidos en las normas NOM-001, NMX-AA-103, CE-CCA-001 y EPA, el agua de estos cuerpos superficiales no es apta para uso agrícola. La irrigación de cultivos con esta agua contaminada representa un riesgo potencial para la seguridad alimentaria, ya que podría facilitar la

bioacumulación de metales pesados y compuestos orgánicos en los productos agrícolas, con el consiguiente peligro para la salud de los consumidores.

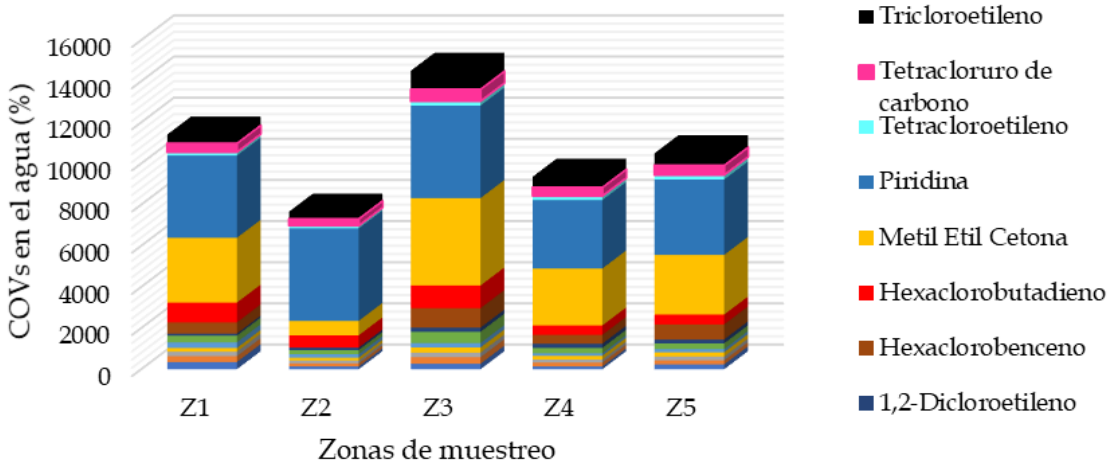


Figura 2. Concentraciones de COVs en el agua del Río Tula y la Presa Endhó.

BIBIOGRAFÍA

Agency for Toxic Substances and Disease Registry, (ATSDR). (2019). *Toxicological Profile for Trichloroethylene*. Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública.

Ahuactzi, H. (2025). Análisis integrado de la Calidad del agua de la microcuenca de los ríos Briones y Negros mediante indicadores fisicoquímicos y biológicos. Tesis de maestría. Facultad de Agrobiología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Tlaxcala. 211 pp.

Alloway, B.J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. Springer. 614 pp.

Buffle, J. y Leppard, G. (1995). Characterization of aquatic colloids and macromolecules. 1. Structure and behavior of colloidal material. *Environmental Science and Technology*, **29**:2169–2175.

Camacho, C. (2007,16 de febrero). Altamente contaminadas, dos presas de Hidalgo. La Jornada. https://www.jornada.com.mx/2007/02/17/index.php?section=estados&article=033n1est.

Environmental Protection Agency of the United State (USEPA). (1986). Guidelines for the Health Risk Assessment of Chemical Mixtures [R]. Washington (DC): US Environmental Protection Agency. ([EPA/630/R-98/002]).

Gobierno de Hidalgo. (2018). *Informe sobre la calidad del agua en la cuenca del río Tula*.

Gunawardena, J., Werbowski, L., Gilbreath, A., Munno, K., Zhu, X., Grbic, J., Wu, L., Sutton, R. (2018). Urban Stormwater Runoff: A Major Pathway for Anthropogenic Substances to Aquatic Ecosystems. *Environmental Pollution*, 237:539-549.

Hernández-Acosta, E. (2011). *Uso de aguas residuales en la agricultura. Estudio de caso; Distrito de Riego 028, Tulancingo, Hidalgo, México*. México. Universidad de Chapingo. 240 pp. http://doi.org/10.13140/2.1.4299.8087.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2021). *Evaluación de metales pesados en ríos de Hidalgo*. https://www.gob.mx/inecc

International Agency for Research on Cancer (IARC). (2018)

Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, **7**(2), 60–72. https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009

Martinez-Tavera, E., Rodriguez-Espinosa, P., Shruti, V., Sujitha, S., Morales-Garcia, S. & Muñoz-Sevilla, N. 2017. Monitoring the seasonal dynamics of physicochemical parameters from Atoyac River basin (Puebla), Central Mexico: Multivariate approach. *Environmental Earth Sciences*, 76(2): 95.

Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery*. McGraw-Hill. 2048 pp.

Moreno, M. (2003). *Toxicología ambiental. Evaluación de riesgo para la salud humana*. España: Mc Graw-Hill. 370 pp.

Secretaría de Ciencia. (2023, 4 octubre). *Las regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESA) en México* [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=VdrrOKdVZos

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2020). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*

Siebe C. (1994). Acumulación y disponibilidad de metales pesados en suelos regados con aguas residuales en el distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 10:15-21

Stumm, W. & Morgan, J. (1996). *Aquatic chemistry: Chemical equilibria and rates in natural waters*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1040 pp.

Warren, L. & Haack, E. (2001). Biogeochemical controls on metal behavior in freshwater environments. *Earth-Science Reviews*. 54:261-320.

IMPACTO DE CAMBIOS EN EL REGÍMEN DE FERTILIZACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO DE AVENA Y ACTIVIDAD MICROBIANA DEL SUELO

Ofelia Ivette Beltrán Paz[1,2]; Elizabeth Solleiro Rebolledo[1]; Gerardo Martínez Jardines[1,2]; Bruno Chávez Vergara[1,2]

[1] Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universitaria, 04510, México.
[2] Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, Cd. Universitaria, 04510, México.

Correo del autor de correspondencia: ofe.ivette@ciencias.unam.mx

RESUMEN

En los sistemas agrícolas intensivos o de larga duración, los procesos ecológicos del suelo se deterioran, perdiéndose los mecanismos que regulan el suministro de nutrientes a las plantas, lo que obliga a depender de fertilización sintética para mantener la producción. Cambiar estas prácticas implica un riesgo económico para los agricultores, especialmente en cultivos extensivos como la avena en agroecosistemas periurbanos de Ciudad de México. En este estudio se evaluó el rendimiento de avena y la actividad microbiana tras sustituir fertilizantes inorgánicos por urea y enmiendas orgánicas (estiércol bovino y vermicomposta), además de considerar la supresión de fertilización, en un suelo volcánico degradado (Andic Anthrosol). Se observó que el estiércol aumentó en 15% el rendimiento respecto a la fertilización sintética y mejoró la eficiencia en el uso de carbono microbiano, mientras que la supresión redujo el rendimiento en 33%, aunque con igual eficiencia microbiana que el estiércol. Estos resultados indican que los suelos degradados pierden resistencia ante cambios de manejo, pero esta vulnerabilidad puede aprovecharse para restablecer la actividad microbiana mediante enmiendas orgánicas o eliminando la fertilización sintética desbalanceada.

PALABRAS CLAVE: *Actividad enzimática específica; biogeoquímica; coeficiente metabólico; enmiendas orgánicas; resistencia ecológica.*

INTRODUCCIÓN

La intensificación agrícola y el uso prolongado de fertilizantes sintéticos han generado una degradación sustancial de los suelos, afectando la capacidad de los ecosistemas agrícolas para mantener procesos ecológicos fundamentales como la disponibilidad de nutrientes (Kuzyakov y Zamanian, 2019). Bajo estas condiciones, la producción depende cada vez más de insumos externos, lo cual provoca un desbalance en la relación entre carbono (C), nitrógeno (N) y fósforo (P), y repercute en la eficiencia del metabolismo microbiano (Nannipieri *et al*., 2012; Guo *et al*., 2011).

La sustitución de fertilizantes inorgánicos por enmiendas orgánicas ha sido promovida como estrategia de rehabilitación de suelos degradados, particularmente en países en desarrollo (Lal, 2020; Siddique *et al*., 2014). Sin embargo, los productores enfrentan

incertidumbre respecto a los rendimientos y, por ende, al ingreso económico que podría derivarse de un cambio de prácticas (Struik y Kuyper, 2017). En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el rendimiento de avena (*Avena sativa*) y la actividad microbiana del suelo tras modificar el régimen de fertilización en un agroecosistema periurbano de la Ciudad de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en suelos Andic Anthrosol altamente degradados de Santiago Tulyehualco, Xochimilco, donde la agricultura de ladera ha perdido cerca del 75% de su materia orgánica original (Solleiro-Rebolledo *et al*., 2019). Se estableció un diseño de bloques al azar con cinco tratamientos: estiércol bovino (CMA), vermicomposta (VCO), urea (URE), fertilizante NPK 16-16-16 y un control sin fertilización (NAD). Las enmiendas orgánicas se aplicaron a razón de 3 kg m², mientras que los fertilizantes inorgánicos se incorporaron en dosis de 30 g m², siguiendo las recomendaciones técnicas locales.

La respuesta se midió en términos de biomasa aérea como indicador de rendimiento forrajero, composición elemental (C, N, P) y calidad nutricional (relaciones C:N y C:P). La actividad microbiana se evaluó mediante biomasa de C y N microbiano (Vance *et al*., 1987), actividades enzimáticas claves para la adquisición de nutrientes (Acosta-Martínez y Tabatabai, 2000), mineralización de C (Robertson *et al*., 1999) y cociente metabólico qCO_2 (Anderson y Domsch, 1993). Se calculó además un índice de resistencia (Rs) para determinar la capacidad del sistema frente al cambio en la fertilización (Orwin y Wardle, 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El rendimiento de avena mostró diferencias significativas entre tratamientos. La aplicación de estiércol bovino incrementó el rendimiento en un 15% respecto al NPK, superando además a la urea y a la vermicomposta. En contraste, la supresión de fertilización redujo el rendimiento en un 33% (Lv *et al*., 2020; Chen *et al*., 2018).

En cuanto a la calidad del forraje, el tratamiento con estiércol mejoró las concentraciones de N y P, reflejándose en relaciones C:N y C:P más bajas, lo cual implica mayor contenido proteico y mejor digestibilidad (Capstaff y Miller, 2018).

A nivel microbiano, la adición de estiércol y la supresión de fertilización promovieron mayor eficiencia en el uso de carbono (menor qCO_2), mientras que urea y NPK mostraron valores elevados de qCO_2 y de actividades enzimáticas específicas, lo cual se interpreta como un metabolismo menos eficiente y un mayor gasto energético en la adquisición de nutrientes (Rodríguez-Bustos *et al*., 2022; Chávez-Vergara *et al*., 2018). La biomasa microbiana de C fue mayor en los tratamientos con estiércol y sin fertilización, mientras que urea redujo significativamente el Cmic y la relación C:N microbiana, generando un desbalance (Sigurdarson *et al*., 2018).

El índice de resistencia (Rs) indicó que los suelos degradados pierden estabilidad frente a modificaciones en el manejo, pero esta pérdida puede constituir una oportunidad de mejora. El cambio hacia estiércol bovino no solo aumentó el rendimiento, sino que

también favoreció el acoplamiento estequiométrico entre plantas, suelo y microorganismos, similar a lo observado en ecosistemas forestales estables (Ding *et al*., 2022; Pang *et al*., 2019).

Los resultados confirman que la sustitución de fertilización sintética por enmiendas orgánicas puede mantener o mejorar la productividad y al mismo tiempo restaurar la funcionalidad microbiana del suelo. El estiércol bovino resultó más eficaz que la vermicomposta, probablemente debido a su mayor contenido de nutrientes disponibles y su capacidad de generar un equilibrio estequiométrico favorable (Paul, 2016).

La urea, pese a su alta concentración de nitrógeno, provocó ineficiencia metabólica y redujo la biomasa microbiana, lo cual pone en evidencia que los fertilizantes de formulación simplificada tienden a desbalancear los ciclos de nutrientes y deteriorar la funcionalidad del suelo (Mason *et al*., 2022). El hecho de que la supresión de fertilización redujera el rendimiento, pero mejorara parcialmente la eficiencia microbiana, sugiere que los sistemas agrícolas intensivos pueden recuperar funciones ecológicas al detener insumos desbalanceados, aunque esto implique un riesgo económico a corto plazo (Shahbaz *et al*., 2017; Khan *et al*., 2007).

CONCLUSIONES

La aplicación de estiércol bovino elevó el rendimiento de avena en un 15% respecto a la fertilización sintética y mejoró la eficiencia microbiana.

La supresión de fertilización redujo la producción en un 33%, pero favoreció ajustes en la eficiencia del uso de carbono por parte del microbiota.

Los suelos periurbanos degradados son altamente sensibles a cambios en la fertilización, mostrando baja resistencia, pero esta condición puede aprovecharse para implementar prácticas de restauración.

No todas las enmiendas orgánicas generan efectos equivalentes: el estiércol fue más eficiente que la vermicomposta en el restablecimiento de las funciones ecológicas.

La transición hacia la fertilización orgánica no debe verse únicamente como un riesgo, sino como una oportunidad de reconciliar la productividad agrícola con la sostenibilidad a largo plazo.

AGRADECIMIENTOS.

Este estudio fue financiado por la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México a través del proyecto SECITI/071/2018.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta-Martínez, V., Tabatabai, M., 2000. Enzyme activities in a limed agricultural soil. *Biology and Fertility of Soils*, 31, 85–91. https://doi.org/10.1007/s003740050628.

Anderson, T., Domsch, K., 1993. The metabolic quotient for CO2 (qCO2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil Biology and Biochemistry,* 25, 393–395. https://doi. org/10.1016/0038-0717(93)90140-7.

Capstaff, N., Miller, A., 2018. We are improving the yield and nutritional quality of forage crops. *Frontiers in Plant Science*, 9, 535. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00535.

Chávez-Vergara, B., Merino, A., González-Rodríguez, A., Oyama, K., García-Oliva, F., 2018. Direct and legacy effects of plant traits control litter decomposition in a deciduous oak forest in Mexico. *PeerJ,* 6, e5095.

Chen, Z., Xu, Y., He, Y., Zhou, X., Fan, J., Yu, H., 2018. Nitrogen fertilization stimulated soil heterotrophic but not autotrophic respiration in cropland soils: a greater role of organic over inorganic fertilizer. *Soil Biology and Biochemistry,* 116, 253–264. https://doi.org/ 10.1016/j.soilbio.2017.10.029.

Ding, D., Arif, M., Liu, M., Li, J., Hu, X., Geng, Q., Yin, F., Li, C., 2022. Plant-soil interactions and C:N:P stoichiometric homeostasis of plant organs in riparian plantation. *Frontiers in Plant Science.* 13, 979023.

Guo, P., Wang, C., Jia, Y., Wang, Q., Han, G., Tian, X., 2011. Responses of soil microbial biomass and enzymatic activities to fertilizations of mixed inorganic and organic nitrogen at a sub-tropical forest in East China. *Plant Soil,* 338, 355–366. https://doi. org/10.1007/s11104-010-0550-8.

Khan, S., Mulvaney, R., Ellsworth, T., Boast, C., 2007. The myth of nitrogen fertilization for soil carbon sequestration. *Journal Environmental Quality,* 36, 1821–1832. https://doi.org/ 10.2134/jeq2007.0099.

Kuzyakov, Y., Zamanian, Z., 2019. Agropedogenesis humankind as the sixth soil-forming factor and attractors of agricultural soil degradation. *Biogeosciences*, 16, 4783–4803. https://doi.org/10.5194/bg-16-4783-2019.

Lal, R., 2020. Food security impacts of the "4 per thousand" _initiative. *Geoderma,* 374 (114), 424.

Lv, F., Song, J., Giltrap, D., Feng, Y., Yang, X., Zhang, S., 2020. Crop yield and N2O emission affected by long-term organic manure substitution fertilizer under winter wheat-summer maize cropping system. *Science Total Environmental,* 732, 139321 https://doi. org/10.1016/j.scitotenv.2020.139321.

Mason, R., Craine, J., Lany, N., Jonard, M., Ollinger, S., Groffman, P., Fulweiler, R., Angerer, J., Read, Q., Reich, P., Templer, P., Elmore, A., 2022. Evidence, causes, and consequences of declining nitrogen availability in terrestrial ecosystems. *Science,* 376, eabh3767. https://doi.org/10.1016/10.1126/science.abh3767.

Nannipieri, P., Giagnoni, L., Renella, G., Puglisi, E., Ceccanti, B., Masciandaro, G., Fronasier, F., Moscatelli, M.C., Marinari, S., 2012. Soil enzymology: classical and molecular approaches. *Biology and Fertility of Soils, 48*, 743–762. .

Orwin, K., Wardle, D., 2004. New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances. *Soil Biology and Biochemistry,* 36, 1907–1912. https://doi. org/10.1016/j.soilbio.2004.04.036.

Pang, Y., Tian, J., Zhao, X., Chao, Z., Wang, Y., Zhang, X., Wang, D., 2019. The linkages of plant, litter and soil C:N:P stoichiometry and nutrient stock in different secondary mixed forest types in the Qinling Mountains, China. *PeerJ*, 8, e9274. https://doi.org/ 10.7717/peerj.9274.

Paul, E., 2016. The nature and dynamics of soil organic matter: plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization. *Soil Biology and Biochemistry,* 98, 109–126. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.04.001.

Piluzza, G., Sulas, L., Bullitta, S., 2014. A review of tannins in forage plants and their role in animal husbandry and environmental sustainability. *Grass and Forage Science,* 69, 32–48. https://doi.org/10.1111/gfs.12053.

Robertson, P., Coleman, D.C., Bledsoe, C.S., Sollins, P., 1999. Standard Soil Methods for Long-term Ecological Research. Oxford University Press, New York.

Rodríguez-Bustos, L., Galicia, L., Chávez-Vergara, B., Beltrán-Paz, O., 2022. Microbial metabolic activity as legacy of agricultural management in maize agroecosystems from Mexico highlands. Trop. Subtrop. *Agroecosystems,* 25 (3), 1–14. https://doi. org/10.56369/tsaes.3911.

Shaw, B., Vliet, J., Verburg, P., 2020. The peri-urban of Europe: a systematic review of multifaceted processes. *Landscape and Urban Planning,* 196, 103733 https://doi.org/10.1016/j. landurbplan.2019.103733.

Siddique, S., Hamid, M., Tariq, A., Gul Kazi, A., 2014. Organic farming: the return to nature. In: Ahmad, P., et al. (Eds.), Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes, vol 2. Springer Science Business.

Sigurdarson, J., Svane, S., Karring, H., 2018. The molecular processes of urea hydrolysis concerning ammonia emissions from agriculture. Reviews in Environmental Science and Biotechnology. https://doi.org/10.1007/s11157-018-9466-1.

Solleiro-Rebolledo, E., Rivera-Uria, Y., Chávez-Vergara, B., Diaz-Ortega, J., Sedov, S., Alcal´a-Martínez, R., Beltr´an-Paz, O., Jardines-Martínez, G., 2019. Evolution of the landscape and pedodiversity on volcanic deposits in the south of the Basin of Mexico and its relationship with agricultural activities. *Terra Latinoamericana,* 37, 501–518.

Struik, P., Kuyper, T., 2017. Sustainable intensification in agriculture: the richer shade of green. A review. Agronomy for Sustainable Development 37, 39. https://doi.org/10.1007/s13593-017- 0445/7.

Vance, E., Brookes, A., Jenkinson, D., 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biology and Biochemistry. 19, 703–707. https://doi.org/10.1016/ 0038-0717(87)90052-6.

Velásquez, G., Ngo, P., Rumpel, C., Calabi-Floody, M., Redel, Y., Turner, B., Condron, L., Mora, M., 2016. Chemical nature of residual phosphorus in Andisols. *Geoderma,* 271, 27–31. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.027.

ESTRUCTURA DE LA COMUNIDAD DE MICROARTRÓPODOS EDÁFICOS EN UN GRADIENTE ALTITUDINAL EN UN BOSQUE SECO EN ACÁMBARO, GUANAJUATO, MÉXICO

Daniel Isaac Sánchez Chávez[1]; Yotam Israel Hernández Gaspar[1]; Fernando Ayala Niño[2]

[1]Laboratorio de Ecología Microbiana, UBIPRO, FES Iztacala, 54090, Edo Mex, México.
[2]Laboratorio de Edafología, UBIPRO, FES Iztacala, 54090, Edo Mex, México.

Correo del autor de correspondencia: leinadisch@iztacala.unam.mx

RESUMEN

Los microartrópodos del suelo tienen funciones clave en el funcionamiento de los ecosistemas forestales, tales como el control de poblaciones de microorganismos, así como el desmenuzamiento de la hojarasca. No obstante, estos organismos son sensibles a cambios en la temperatura, humedad y contenido de nutrientes, lo cuales son característicos de una variación altitudinal. El objetivo del presente estudio fue determinar la estructura de la comunidad de microartrópodos edáficos en un gradiente altitudinal de un bosque seco. Los resultados arrojaron un total de 2 099 individuos, siendo los grupos más abundantes Prostigmata, Oribatida y Mesostigmata con 903, 756 y 219 individuos respectivamente. Así mismo, los índices ecológicos muestran que los sitios más diversos corresponden al punto medio en el gradiente altitudinal, mientras los menos diversos fueron los puntos alto y bajo, lo cual sugiere condiciones microambientales homogéneas en el punto medio y heterogéneas en los puntos alto y bajo, lo cual genera un estrés en los organismos, reflejado en la composición de sus comunidades.

PALABRAS CLAVE: *Ácaros del suelo; índices ecológicos; fauna edáfica.*

INTRODUCCIÓN

Los microartrópodos edáficos, como ácaros, colémbolos, insectos, arañas y otros taxa, llevan a cabo funciones muy importantes y diversas para el mantenimiento de los procesos del suelo, entre las que se incluyen, el control de las poblaciones tanto de microorganismos como de otros microartrópodos, así como el desmenuzamiento de la hojarasca que es depositada en el suelo (Neher y Barbercheck, 2019). Ambos mecanismos tienen impactos profundos en la descomposición de la materia orgánica y el reciclaje de los nutrientes, los cuales son indispensables para un adecuado funcionamiento del suelo (Jernigan *et al.,* 2023; Lakshmi *et al.,* 2020). Sin embargo, la presencia y diversidad de estos organismos son afectadas por cambios ambientales, como aquellos que se dan por cambios en la altitud que modifican la temperatura, humedad y contenido de materia orgánica, factores a los cuales los microartrópodos son sensibles (Illig *et al.,* 2010). Los estudios de cómo se estructuran sus comunidades a lo largo de gradientes altitudinales nos indican cómo las condiciones ambientales cambian con la elevación (menos temperatura y humedad), particularmente en ambientes subtropicales (Bokhorst *et al.,*

2024; González-Reyes *et al.,* 2017), templados (Hugo-Coetzee y Le Roux, 2018), lo cual impacta en la estructura de su comunidad. No obstante, el conocimiento sobre la estructura y composición de estos organismos en ambientes de bosque tropical seco es escaso. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue determinar la estructura de la comunidad de microartrópodos en un gradiente altitudinal en un bosque seco al sur de Guanajuato.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El Ejido Los Desmontes (19.927295, -100.739295) se encuentra en el municipio de Acámbaro al sur del estado de Guanajuato, México. El sitio se caracteriza por presentar un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw) (García, 2004). En este sitio, se tomaron 18 muestras de suelo, divididas en tres puntos: seis en el punto alto (a – 2254 msnm), seis en el punto medio (m – 2190 msnm) y seis en el punto bajo (b – 2155 msnm) (Figura 1).

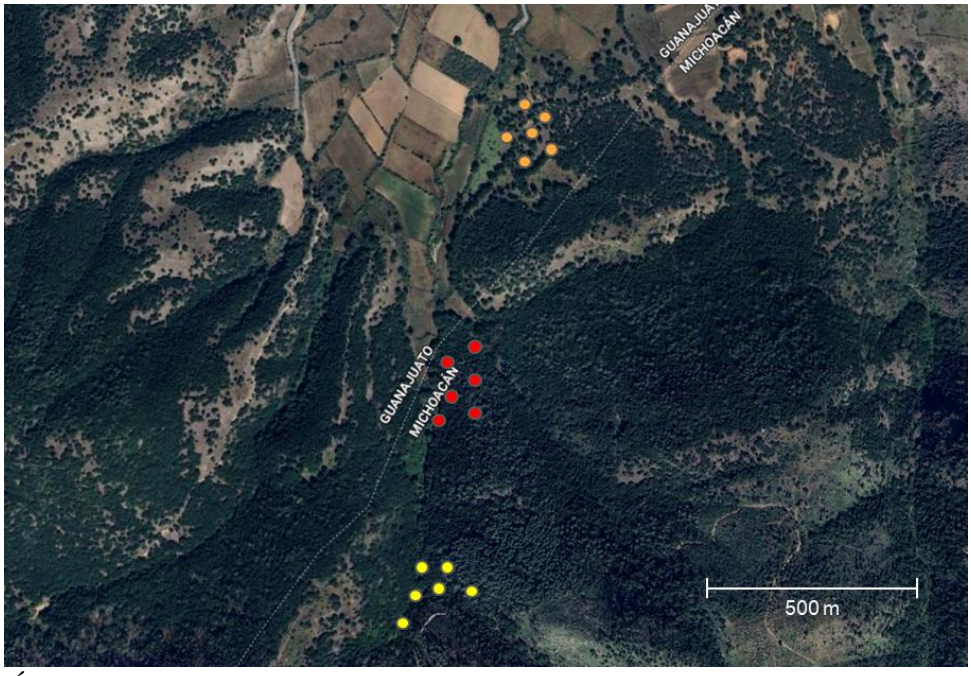


Figura 1. Área de estudio en el Ejido Los Desmontes, en Acámbaro, Guanajuato, México. Imagen tomada de Google Maps (Google, s.f.)

Extracción e identificación de los microartrópodos. Para la extracción de los microartrópodos, se utilizó la técnica de extracción del Embudo de Berlese-Tullgren (Krantz y Walter, 2009). La identificación de los especímenes se realizó con ayuda de un microscopio estereoscópico y claves taxonómicas de Krantz y Walter (2009) y Dindal (1990).

Análisis estadísticos. Se realizó un ANOVA de una vía, con ayuda de software R (R Core Team, 2021) para determinar las diferencias significativas entre los sitios respecto a la

densidad de la mesofauna. Así mismo, se realizó una prueba post-hoc de Tukey HSD, para determinar el sitio diferente**.**

Índices ecológicos. Finalmente, para conocer la estructura y composición de la comunidad de los microartrópodos de cada punto, así como las diferencias y similitudes entre estos, respecto a la diversidad, se utilizaron los índices de Shannon (1948), Simpson (1949) y Bray-Curtis (1957) con ayuda del software R (R Core Team, 2021).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvo un total de 2,099 individuos agrupados en 18 órdenes, teniendo Prostigmata, Oribatida y Mesostigmata una abundancia relativa de 43.01, 36.06 y 10.42% respectivamente (Figura 2).

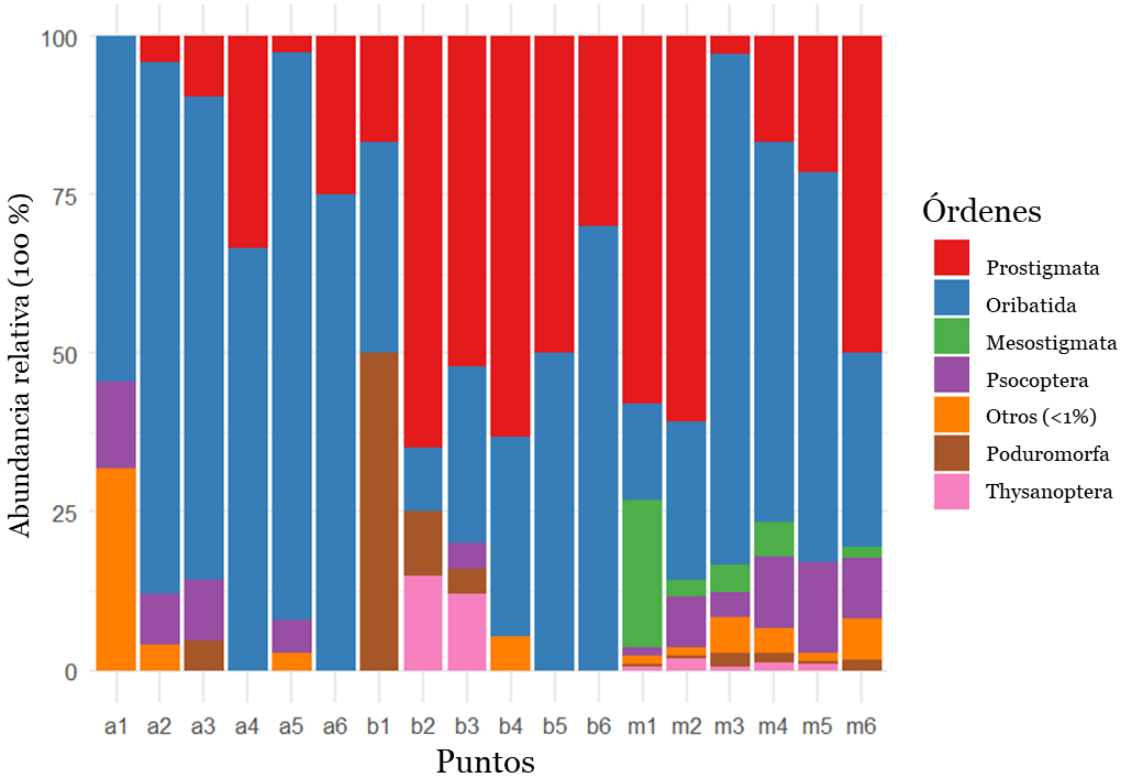


Figura 2. Abundancia relativa de los órdenes de mesofauna en los tres puntos de muestreo.

El análisis de ANOVA muestra diferencias significativas de la densidad entre puntos ($F_{2,15}$=6.96, p=0.007). La prueba post-hoc de Tukey destaca que los puntos m tuvieron mayor densidad significativamente que los puntos a (p=0.015) y los puntos b (p=0.014). En contraste, las densidades no difirieron entre los puntos a y b (p=0.999).

Los índices de diversidad de Shannon y Simpson muestran que el punto con mayor diversidad fue el m6 (H'=1.312, D=0.645), mientras que el menos diverso fue el a5 (H'=0.446, D=0.195). Estos índices sugieren que los sitios más diversos corresponden al punto m, mientras los menos diversos, a los puntos más altos. Resultados similares

fueron reportados por Pahari *et al.* (2007), Illig *et al.* (2010), González-Reyes *et al.* (2017). De acuerdo con los autores, esto puede deberse a una mayor disponibilidad de recursos en altitudes más bajas, debido a su remoción de las partes más altas por erosión y transporte, lo que ocasiona la formación de perfiles más profundos del suelo, así como acumulación de recursos en estos sitios.

Esto también se observó en los puntos de estudio, donde hubo un mayor desarrollo de suelo en las partes bajas (Sánchez-Chávez *et al.*, no publicado). Sin embargo, a diferencia de los otros estudios, el punto más diverso no fue el más bajo, lo cual pudo ser consecuencia de otros procesos que están sucediendo en el sitio y generan estrés en los organismos, por lo tanto, hay una menor diversidad de los microartrópodos. No obstante, faltan más estudios para identificar estas causas. Así mismo, el índice de similitud de Bray-Curtis (Figura 3) indicó que las comunidades del punto medio (m3, m4 y m5) son muy similares y equitativamente diversas, mientras que las comunidades de los puntos a y b se agrupan en diferentes subgrupos, lo cual indica que: (1) los micrositios del punto medio (m) son más homogéneos en su composición, lo cual indicaría condiciones microambientales similares, mientras que (2) los micrositios de los puntos a y b son heterogéneos, probablemente debido a diferencias microambientales entre los micrositios, lo que explica esta heterogeneidad en la composición de la comunidad de los microartrópodos.

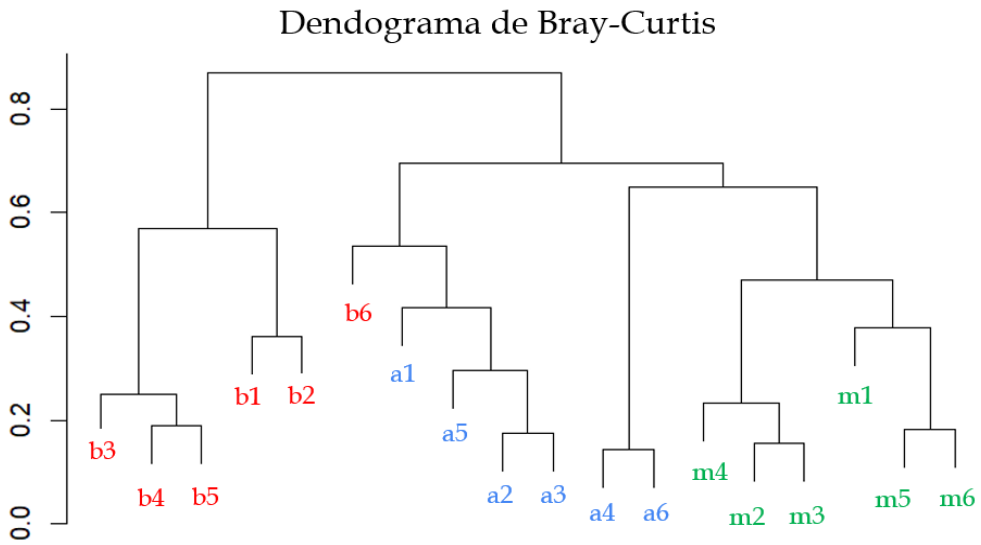


Figura 3. Dendrograma de disimilitud de Bray-Curtis. Las alturas del eje vertical indican el nivel de disimilitud entre las comunidades de los micrositios entre los tres puntos (0.0 – más similares entre sí; 0.8 – menos similares). Los micrositios se agrupan en punto alto (a1-a6), medio (m1-m6) y punto bajo (b1-b6).

CONCLUSIONES

La estructura de la comunidad de los microartrópodos en el gradiente altitudinal de un bosque seco presentó mayor abundancia de Prostigmata, Oribatida y Mesostigmata,

todos ellos pertenecientes a Acari. El punto con la mayor diversidad se registró en el punto medio del gradiente, mientras que el punto alto fue el menos diverso, lo que sugiere que el gradiente altitudinal en el bosque modifica las condiciones microambientales y con ello la estructura de la comunidad de microartrópodos.

Estos resultados sugieren que las comunidades edáficas en el bosque seco responden al gradiente y a las condiciones microambientales específicas. Sin embargo, es necesario más estudios para poder entender las dinámicas ecológicas detrás de la distribución y diversidad de los organismos edáficos en estos ambientes.

BIBLIOGRAFÍA

Bokhorst, S., Contador, T., Mackenzie, R., Convey, P. & Aerts, R. (2024). Habitat type controls microarthropod community changes across a Magellanic sub-Antarctic elevation gradient. *Frontiers in Ecology and Evolution*, *12*, 1440649. https://doi.org/10.3389/FEVO.2024.1440649/BIBTEX.

Bray, J. R. & Curtis, J.T. (1957). An Ordination of the Upland Forest Communities of Southern Wisconsin. *Ecological Monographs, 27* (4): 325–349.

Dindal, D.L. (1990). *Soil Biology Guide.* Wiley.

García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana).* Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

González-Reyes, A.X., Corronca, J. A. & Lizarralde, M.S. (2017). Changes of arthropod diversity across an altitudinal ecoregional zonation in Northwestern Argentina. *PeerJ*, **5**, e4117. https://doi.org/10.7717/peerj.4117Krantz, G. W., & Walter, D.E. (2009). *A Manual of Acarology.* Texas Tech University Press.

Google (s.f.). [Ejido Los Desmontes, Acámbaro, Guanajuato, México]. Recuperado el 14 de julio de 2025 de https://acortar.link/3tij8U

Jernigan, A., Kao-Kniffin, J., Pethybridge, S. & Wickings, K. (2022). Soil microarthropod effects on plant growth and development. *Plant and Soil 2022 483:1*, *483*(1), 27–45. https://doi.org/10.1007/S11104-022-05766-X.

Hugo-Coetzee, E. A., & le Roux, P. C. (2018). Distribution of microarthropods across altitude and aspect in the sub-Antarctic: climate change implications for an isolated oceanic island. *Acarologia*, *58*(Suppl), 43–60.

Illig, J., Norton, R. A., Scheu, S. & Maraun, M. (2010). Density and community structure of soil- and bark-dwelling microarthropods along an altitudinal gradient in a tropical montane rainforest. *Experimental & Applied Acarology*, *52*(1), 49. https://doi.org/10.1007/S10493-010-9348-X

Lakshmi, G., Okafor, B.N. & Visconti, D. (2020). Soil Microarthropods and Nutrient Cycling. *Environment, Climate, Plant and Vegetation Growth*, 453–472. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_18.

Neher, D.A., & Barbercheck, M.E. (2019). Soil Microarthropods and Soil Health: Intersection of Decomposition and Pest Suppression in Agroecosystems. *Insects 2019, Vol. 10, Page 414*, *10*(12), 414.

Pahari, D., Hazra, A. K. & Saha, G. K. (2007). Diversity and distribution of soil arthropod communities in relation to altitude and edaphic factors of different altitudinal environments of Darjeeling Himalayas, India. *Records of the Zoological Survey of India*, 107(4), 43–59.

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for

Statistical Computing, Vienna, Austria. URL https://www.R-project.org/.

Shannon, C.E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal, 27*(3), 379–423.

Simpson, E.H. (1949). Measurement of diversity. *Nature*, *163*, 688. https://doi.org/10.1038/163688a0.

EVALUACIÓN EDAFOECOLÓGICA EN AGROECOSISTEMAS CON DISTINTOS AÑOS DE PLASTICULTURA EN EL DESIERTO SONORENSE

Dalia Berenice Borbón Palomares[1]; Blanca González Méndez[1]

[1] Universidad Nacional Autónoma de México, 83250, Hermosillo, México.

Correo del autor de correspondencia: bereborbon@gmail.com

RESUMEN

Los plásticos han impulsado el progreso de la sociedad en las últimas décadas. Sin embargo, su versatilidad también los ha convertido en contaminantes sin precedentes, y las repercusiones de esto comienzan a vislumbrarse. Ejemplo es la creciente preocupación por la contaminación con microplásticos (MP) y sus efectos en los agroecosistemas. El objetivo de este estudio fue realizar la evaluación edafoecológica en agroecosistemas con diferente tiempo bajo plasticultura (27, 10, 6 y 0 años) en el distrito de riego 051-Costa de Hermosillo, en el estado de Sonora. A partir de los datos de descripción de suelos se realizaron evaluaciones edafoecológicas, adicionalmente se determinó el pH y la conductividad eléctrica (CE). El análisis edafoecológico permitió identificar que los suelos con plasticultura presentan agregados menos estables que los suelos con cero años (testigo), lo que puede estar relacionado con la presencia de MP. Esta presencia de MP puede promover la fácil desintegración física de los agregados, haciendo al suelo más susceptible a la erosión. En todos los suelos el pH y la CE tienden a aumentar a profundidad, lo que puede estar relacionado con la acumulación de carbonatos encontrada en estos suelos. Todos los perfiles, presentan acumulación en forma de venas de carbonatos, lo que sugiere un proceso sostenido de redistribución y precipitación de carbonatos secundarios, característico de ambientes áridos donde el balance hídrico favorece la evaporación sobre la infiltración. Este movimiento de sales puede ser indicador de una posible migración de los MP a profundidad, sobre todo los de tamaño más pequeño.

PALABRAS CLAVE: *Propiedades edáficas; Contaminación de suelos; Agroecosistemas; Zonas áridas; Plasticultura; Microplásticos.*

INTRODUCCIÓN

La industria agrícola se ha convertido en una importante consumidora de plásticos en muchos lugares del mundo, sobre todo en regiones de climas áridos (Li *et al.,* 2020). Al uso de plásticos en este sector se le conoce como plasticultura. La plasticultura ha ofrecido soluciones a los desafíos de la agricultura moderna, centrados en maximizar la productividad del suelo y el agua sin agotar los recursos naturales (Mormile *et al.,* 2017). La plasticultura se implementa desde las etapas iniciales del cultivo hasta el empaque de los productos para su distribución, por lo que se generan grandes cantidades de residuos. La labranza continua, junto con los factores ambientales -principalmente alta radiación-

y la actividad biológica del suelo, favorecen la fragmentación de los residuos en partículas plásticas cada vez más pequeñas. Cuando estas partículas alcanzan tamaños entre 1 µm y 5 mm se clasifican como microplásticos (MP) (Sa'adu *et al.,* 2023). Los MP presentan diferentes formas -fibras, fragmentos, pellets y espumas-, así como diversas composiciones químicas, incluyendo polietileno (PE), polietileno de baja (LDPE) y alta densidad (HDPE), cloruro de polivinilo (PV), polipropileno (PP), entre otros (Mormile *et al.,* 2017). La disposición inadecuada de los residuos sumada a los procesos de intemperismo ha promovido la presencia ubicua de MP en todos los ecosistemas (Guo *et al.,* 2020).

Actualmente, los MP han recibido una creciente atención debido a su potencial amenaza para el suelo y los ecosistemas terrestres (Guo *et al.,* 2020). Debido a que, una vez que los MP se incorporan al suelo, se acumulan, se translocan, se intemperizan, se degradan y migran a otros compartimentos ambientales (Hurley *et al.,* 2018). Sumado a esto, la cantidad, estratificación y características de los MP —forma y composición— presentan una alta variabilidad, lo que dificulta su estudio y monitoreo (Sa'adu *et al.,* 2023). Aunque los estudios en suelos agrícolas son escasos, se ha identificado que la implementación prolongada de la plasticultura es la fuente más común (Li *et al.,* 2020). Los MP pueden alterar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, pudiendo transferirse a las plantas afectando su fisiología vegetal, la fertilidad de los suelos, y con ello la productividad agrícola, la seguridad alimentaria y la bioacumulación en las cadenas tróficas.

Este panorama es especialmente preocupante debido al prolongado tiempo de residencia de los MP en el suelo, estimado en cientos de años, lo que favorece su acumulación y la presencia de sus efectos a largo plazo (Li *et al.,* 2020; Guo *et al.,* 2020; Sa'adu *et al.,* 2023). En el caso de México, hasta la fecha, se dispone de muy escasa información sobre los efectos de los MP en los suelos agrícolas bajo sistemas de plasticultura. Esta limitación representa una oportunidad valiosa para estudiar el impacto de la plasticultura en la generación, migración y destino de los MP en estos agroecosistemas. Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue realizar un levantamiento edafoecológico en agroecosistemas del distrito de riego 051-Costa de Hermosillo, con el fin de estimar las variables edáficas de los suelos bajo distintos tiempos de plasticultura.

MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se ubica en el sistema de producción agrícola perteneciente al distrito de riego 051-Costa de Hermosillo en la parte centro-poniente del estado de Sonora. Las características naturales de la región corresponden a una llanura aluvial (Medina *et al.,* 2024). El clima es semiárido, con una temperatura media anual de 24 °C, y extremos de hasta 49 °C durante el verano y 5 °C en el invierno. Las lluvias se presentan durante los meses de junio a septiembre. La precipitación media anual varía de 75 a 200 mm. En contraste, la tasa de evaporación es muy alta, con valores que varían entre 2400 y 2600 mm (CONAGUA, 2024). El abastecimiento de este sistema agrícola depende del acuífero de la Costa de Hermosillo, que presenta un proceso avanzado de intrusión

marina (Medina *et al.,* 2024). De acuerdo con INEGI (2013), los grupos de suelo corresponden a Calcisols, Luvisols, Regosols y Vertisols. Los suelos agrícolas generan el 26% del valor de la producción agrícola total estatal y contribuyen con más del 50% de las exportaciones del estado (Amaro-Rosales, 2023). En cuanto al manejo agrícola, frente a las condiciones climáticas de la región, la implementación de la plasticultura ha sido una solución eficiente para mantener los rendimientos de la producción agrícola de sandía, melón, pepino, entre otros. Actualmente, se ha extendido cada vez más el uso de acolchado, donde se utilizan películas plásticas de diferentes grosores y colores, y, aunque son eficientes, la vida útil de estas películas es corta (Amaro-Rosales, 2023) y después de la cosecha se recogen, se apilan en los caminos entre los surcos y se queman. Sin embargo, no se recogen por completo, por lo que se observan restos del acolchado en la superficie y el subsuelo. También se utilizan mangueras planas para sistemas de riego a lo largo de los surcos, tuberías, mallas protectoras y materiales de embalaje.

Para el levantamiento edafológico se seleccionaron 3 sitios con diferente tiempo bajo plasticultura: 27, 10 y 6 años. Adicionalmente se seleccionó un sitio sin historial de plasticultura -0 años- que servía como testigo. Se realizó un diseño de muestreo por bloques, donde cada bloque está definido por el tiempo bajo plasticultura (27, 10, 6 y 0 años). En cada sitio se realizó la apertura de 5 calicatas para la descripción de perfiles de acuerdo con el manual de Siebe *et al.,* (2006). Se realizaron un total de 20 perfiles y en cada perfil se tomaron muestras por horizonte para la evaluación de las propiedades físicas y químicas. Se obtuvieron 75. Las muestras fueron transportadas al laboratorio de Estudio de la Zona Crítica (LEZC) de la Estación Regional del Noroeste de la UNAM, donde se secaron al aire libre en un ambiente controlado y posteriormente fueron tamizadas con una malla de 2 mm. A cada muestra se le determinó el pH y la conductividad eléctrica (CE) (relación suelo:agua 1:2.5 p/v) (ISRIC, 1992). Con los datos de las descripciones de los perfiles en campo, se realizó una evaluación edafoecológica para cada perfil, estimando diversas propiedades como la capacidad de aireación de los suelos (CA), disponibilidad de agua (dCC), volumen de poros totales (VPT) y conductividad hidráulica (Kf) (Siebe *et al.,* 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de pH y conductividad eléctrica. Los suelos con 27 años bajo plasticultura son suelos alcalinos, con valores de pH que varían de 7.6 a 9.2 y una CE de 0.1 y 1.1 $dS \cdot m^{-1}$. Los suelos con 10 años bajo plasticultura son suelos alcalinos con un pH de 7.4 a 9.1 y una CE de 0.1 y 0.7 $dS \cdot m^{-1}$. Los suelos con 6 años bajo plasticultura, son ligeramente alcalinos con valores de pH que varían de 7.1 a 8.9 y una CE de 0.1 y 0.7 $dS \cdot m^{-1}$. Los suelos con 0 años bajo plasticultura son ligeramente alcalinos con valores de pH que varían de 7.8 a 8.6. A diferencia de los suelos bajo plasticultura donde el pH tiende a aumentar a profundidad, el pH mostró una tendencia a disminuir ligeramente. De manera similar a los suelos bajo plasticultura, la CE incrementó a profundidad, con valores entre 0.1 y 2.4 $dS \cdot m^{-1}$.

Evaluación edafoecológica. Los suelos con 27 años bajo plasticultura, presentan texturas franco limosas (CL) a franco arcillosas (CR) con un contenido promedio de 35% de arcillas (R). La alta densidad aparente (DA) y compactación a profundidad probablemente relacionada con acumulación de carbonatos (2-10%) pueden limitar la infiltración y el movimiento vertical de MP (Márquez *et al.,* 2004). Mientras que las texturas francas aunadas a un VPT medio a alto en la superficie pueden favorecer su movimiento lateral o retención en los horizontes superficiales. La baja CA y la baja Kf en ciertas zonas pueden dificultar el movimiento de MP a profundidad, incrementando su acumulación en la superficie. La baja estabilidad de los agregados puede ser debida a la presencia de MP, lo que puede afectar su desintegración física en eventos de lluvia torrenciales y eventualmente incorporar los MP al suelo (Zhang y Lui, 2018).

Los suelos con 10 años bajo plasticultura presentan texturas franco arcillosas (CR) a arcillosas (R) con contenido de R entre 35 y 60%. Las texturas más finas, con alto contenido de arcilla, pueden favorecer la retención de MP, lo que puede limitar su movilidad vertical. La compactación entre los 5 y 30 cm -alta DA y contenido medio de carbonatos-, junto con el bajo VTP y CA, puede actuar como una barrera adicional a la infiltración profunda, promoviendo la acumulación de MP en los horizontes superficiales. Además, la baja estabilidad de agregados hace que estos suelos sean más susceptibles a la erosión eólica, lo que puede facilitar el desprendimiento y transporte de MP previamente atrapados en los agregados. Esto, junto con la escorrentía superficial o el riego, podría favorecer la redistribución horizontal de los MP dentro y fuera de los suelos.

Los suelos con 6 años bajo plasticultura presentan texturas arenosa franca (AC) a franco arcillo limosas (CRL) con contenido de R entre 5 y 35%, con un enriquecimiento de arena (A) a diferentes profundidades. Las texturas más gruesas, con mayor contenido de arenas, en combinación con altas Kf pueden favorecer una mayor infiltración y movilidad vertical de los MP. El contenido de carbonatos es más alto a profundidad media (10-25 y 25-50%), lo que sugiere un movimiento activo a profundidad. Sin embargo, la baja estabilidad de los agregados puede incrementar el riesgo de transporte superficial por escorrentía o arrastre eólico. La elevada CA, aunada a las texturas más gruesas, pueden ser indicativo de la presencia de macroporosidad, lo que podría facilitar la migración de MP por bioturbación o infiltración durante el riego.

Los suelos testigo presentan texturas franco arcillosas (CR) a franco arcillo limosa (CRL) (35%R) en uno de los perfiles, y arcillosa (R) en el resto (60%R). Los carbonatos aumentan a profundidad con presencia de venas de finas a gruesas de $CaCO_3$ (5-15%). Esta acumulación coincide con un incremento en la DA, lo que indica la posible formación de un horizonte con características petrocálcicas incipientes. Aunque la acumulación de carbonatos no causa directamente la compactación, ambos procesos pueden estar asociados a la limitada movilidad del agua, la concentración de solutos y una menor estructuración del suelo en profundidad. En conjunto, estos factores limitan la porosidad y la infiltración, y podrían restringir el movimiento vertical de MP, favoreciendo su acumulación en los horizontes superficiales.

CONCLUSIONES

El levantamiento edafoecológico permitió identificar que en los suelos testigo los agregados son más estables que en los sitios con diferentes tiempos bajo plasticultura 27,10 y 6 años - lo que puede estar relacionado con la presencia de MP derivados de la plasticultura y, a su vez, promover la fácil desintegración física, haciendo al suelo más susceptible a la erosión. Además, los MP contenidos en el interior de los agregados pueden ser liberados y eventualmente moverse más en profundidad en el suelo. En todos los suelos el pH y la CE tienden a incrementar a profundidad, lo que probablemente puede estar relacionado con la acumulación de carbonatos que da lugar a condiciones químicas más alcalinas en los horizontes más profundos. Todos los perfiles, presentan acumulación en forma de venas de carbonatos, lo que sugiere un proceso sostenido de redistribución y precipitación de carbonatos secundarios, característico de ambientes áridos donde el balance hídrico favorece la evaporación sobre la infiltración. Este movimiento de sales puede ser indicador de una posible migración de los MP a profundidad, sobre todo los de tamaño más pequeño.

BIBLIOGRAFÍA

Amaro-Rosales, M. (2023). La agricultura de exportación en Sonora y su relación con la biotecnología: impactos productivos y socioeconómicos en J. L. Hernández-Pérez (ed.), Aspectos socioeconómicos e institucionales de la biotecnología en México, (pp. 87-113). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Sociales.

Comisión Nacional del Agua. (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Costa de Hermosillo (2619), Estado de Sonora.

Guo, J.J., Huang, X.P., Xiang, L., Wang, Y.Z., Li, Y.W., Li, H., Cai, Q.Y., Mo, C.H. & Wong, M.H. (2020). Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environment International*, 137, 105263. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105263.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2013). Carta Edafológica escala 1:250,000 H12-8

Li, W., Wufuer, R. & Duo, J. (2020). Microplastics in agricultural soils: extraction and characterization after different periods of polythene film mulching in an arid region. *Science of the Total Environment*, 749: 141420. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141420.

Mormile, P., Stahl, N. & Malinconico, M. (2017). The World of Plasticulture. In: Malinconico, M. (eds) Soil Degradable Bioplastics for a Sustainable Modern Agriculture. Green Chemistry and Sustainable Technology. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-54130-2_1.

Medina, M.R., Monreal, R., Morales, M. & Gurrola, J.C. (2004). Estimation of the vulnerability to saline intrusion of the coast of Hermosillo aquifer, Sonora, Mexico. *Geofísica Internacional*, *43*(4),

Sa'adu, I., Farsang, A. (2023). Plastic contamination in agricultural soils: a review. *Environ Sci Eur*, 35, 13. https://doi.org/10.1186/s12302-023-00720-9.

Siebe, C., Jahn, R. & amp; Stahr, K. (2006). Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo: México. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, 2ed. 70p.

Zhang, G. S., & Liu, Y. F. (2018). The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Science of the Total Environment*, *642*, 12-20. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.004.

INOCULACIÓN DE *AGAVE SALMIANA* CON HONGOS MICORRIZÓGENOS ARBUSCULARES y *Azospirillum brasilense* EN CONDICIONES DE INVERNADERO

Emily Santiago Moreno[1]; Chelsea Andrea Ponce Cruz[1]; Lourdes Giselle Sanvicente Velázquez[1]; Arcadio Monroy Ata[1]

[1] Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, *Campus* II. Batalla del 5 de mayo, esquina fuerte de Loreto, Col. Ejército de Oriente, C.P. 09230, Iztapalapa, Ciudad de México.

Correo del autor de correspondencia: emilysantm0@gmail.com

RESUMEN

Las zonas áridas y semiáridas se caracterizan por la escasez de agua, lo cual limita el establecimiento vegetal. Sin embargo, el uso de microorganismos como hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) y *Azospirillum brasilense* puede contribuir al desarrollo de plantas en condiciones de estrés hídrico y nutrimental. El objetivo fue comparar la inoculación de microorganismos en un cultivo de *Agave salmiana* (maguey) en condiciones de invernadero. Se aplicaron cuatro tratamientos: HMA, *A. brasilense*, doble inoculación y testigo, para determinar parámetros de crecimiento vegetal, eficiencia en el uso de agua y potencial hídrico de la planta. La pregunta de investigación fue si la inoculación de microorganismos incrementa la tasa de crecimiento relativo en altura de *A. salmiana*. Las semillas germinaron en cajas Petri y se colocaron en macetas durante 31 semanas. Catorcenalmente se registró el crecimiento y el número de pencas; al término del experimento se determinó: biomasa seca y húmeda, colonización micorrízica, eficiencia en el uso del agua y potencial hídrico. Los resultados mostraron que la doble inoculación incrementó significativamente la tasa de crecimiento relativo en altura y se registró un mayor número de pencas en la inoculación con HMA, respecto a los otros tratamientos en ambos casos. Asimismo, tanto en doble inoculación como con un solo inóculo, se favoreció la generación de biomasa aérea en seco y húmedo, aunque sin diferencias significativas. Lo anterior debido a que los inóculos seguramente favorecen la captación de agua y nutrientes. Se concluye que ambos microorganismos favorecen el crecimiento y desarrollo de este maguey.

PALABRAS CLAVE: *Coinoculación; micorriza; rizobacterias; Simbiosis mutualista; tasa de crecimiento relativo.*

INTRODUCCIÓN

Las zonas áridas y semiáridas del país han sido progresivamente afectadas por actividades antrópicas. Estos ambientes se caracterizan principalmente por una escasez de agua, lo cual limita el establecimiento y crecimiento de las plantas (Tarango-Arámbula, 2005). Las agaváceas son consideradas especies clave en esas regiones tanto por su abundancia como por los recursos que proporcionan a otros organismos (García-Mendoza, 2007); sin embargo, se encuentran sometidas a diferentes tipos de estrés, ya que una semilla puede germinar y establecerse, pero para una plántula en un terreno

desnudo es difícil sobrevivir, debido a altas temperaturas y factores limitantes como la escasez de nutrientes y de agua.

Esta situación subraya la necesidad de incluir estrategias efectivas para que las plantas puedan adaptarse a condiciones limitantes. Un enfoque que se puede implementar en especies como *Agave salmiana* Otto ex Salm. es el uso de microorganismos benéficos. La inducción de la simbiosis planta-microorganismo es una técnica que favorece la supervivencia de especies vegetales. Los hongos micorrizógenos arbusculares (HMA) pueden ser una herramienta útil, pues son el tipo de asociación más extendido en la naturaleza (Aguilera-Gómez *et al*., 2007; Rodríguez y Rodríguez 2019). Estas interacciones tienen un impacto importante en el funcionamiento vegetal, porque en plantas micorrizadas existe mayor resistencia a la infección por patógenos y toleran mejor el estrés (Carrillo-Saucedo *et al.,* 2022; Rodrígues y Rodrígues, 2019). Además de los HMA, las rizobacterias también son una alternativa para favorecer el establecimiento y supervivencia de las plantas (Llorente *et al.,* 2016), ejemplo de ello son las bacterias de vida libre del género *Azospirillum* que promueven el crecimiento de las plantas, tienen varios métodos de acción y eventualmente resultan en plantas más grandes y productivas (Jehani *et al.,* 2023).

Estos microorganismos contribuyen al desarrollo de las plantas, por lo que inducir estas simbiosis puede mejorar el establecimiento vegetal bajo condiciones adversas, aumentando el éxito para su supervivencia (Llorente *et al.,* 2016). Por ello, en este trabajo se diseñó un experimento para comparar cuatro tratamientos en *Agave salmiana*, una agavácea de importancia económica, ecológica y cultural; los tratamientos fueron inoculación con hongos micorrizógenos arbusculares, con *Azospirillum brasilense*, doble inoculación y testigo (sin inóculos). El inóculo de hongos micorrizógenos arbusculares tiene a *Rhizophagus irregularis* como especie dominante. El objetivo del estudio fue determinar la influencia de los microorganismos utilizados sobre el crecimiento de las plantas de *Agave salmiana* mediante el registro de parámetros de desarrollo vegetal. La hipótesis es que la doble inoculación (hongos micorrizógenos arbusculares y *A. brasilense*) es la que promueve una mayor tasa de crecimiento relativo debido a la acción sinérgica de ambos microorganismos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se sometieron 120 semillas a una prueba de flotabilidad para determinar la viabilidad. Por su parte, para la germinación de las semillas se utilizaron 6 cajas Petri, contabilizando así la germinación acumulada contra el tiempo en días.

El sustrato utilizado fue proporcionado por el invernadero de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (FESZ), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), cuyo origen es del municipio de Santiago de Anaya, Hidalgo, mezclado con arena sílica en proporción 1:1 (v:v), el cual fue sometido a distintas pruebas fisicoquímicas para determinar pH (mediante un aparato electrónico multiparámetros), densidad real (método del picnómetro), densidad aparente (método de la probeta), capacidad de campo, textura (técnica de Bouyoucos) y porcentaje de espacio poroso.

Se dispusieron 80 macetas sin drenaje, con 20 repeticiones por cada tratamiento, utilizando inóculos comerciales provenientes de "Biofábrica Siglo XXI". Los cuatro lotes fueron: testigo (1200 g suelo), HMA (1200 g suelo + 5 g inóculo micorrízico), *Azospirillum brasiliense* (1200 g suelo + 5 g de inóculo bacteriano) y doble inoculación (1200 g suelo + 5 g inóculo micorrízico + 5 g de inóculo bacteriano).

Durante 31 semanas se realizaron riegos semanales a capacidad de campo, así como un seguimiento del número de pencas y crecimiento en altura y cobertura vegetal; de los dos últimos se obtuvo la tasa de crecimiento relativo (TCR). Al finalizar el experimento, se cosecharon 5 plantas de cada tratamiento para analizar la biomasa húmeda y seca de la parte aérea y de la raíz, con ello se logró obtener el cociente raíz/vástago y la eficiencia en el uso del agua (EUA), que es el cociente entre la biomasa seca total en g (raíz y vástago) sobre la cantidad total de agua irrigada al cultivo en L, esto último al medir semanalmente la cantidad de agua irrigada para todos los tratamientos experimentales. Por su parte, el potencial hídrico foliar se determinó haciendo uso de una cámara de Schöllander al finalizar el experimento, obteniendo primero las pencas desde la base del tallo para introducirlas en la cámara y registrar la presión que provoca la formación de una gota de agua en la base de la penca.

Después de 6 meses de haber inoculado las plantas, se realizó una tinción y preparación de las raíces secundarias. Extrayendo las raíces secundarias y lavándolas con abundante agua, se cortaron y colocaron en frascos de vidrio. Posteriormente fueron cubiertas con KOH al 10% por 24 horas y se enjuagó con abundante agua corriente, se cubrieron las raíces con HCl al 10% por 10 minutos. Se escurrió el HCl y, sin enjuagar las raíces, fueron añadidas a la solución de azul de tripano al 0.05% durante 24 horas, posteriormente fueron lavadas para quitar el exceso de colorante. Se montaron paralelamente en portaobjetos y estos mismos se observaron bajo el microscopio con el objetivo fuente 40X y 100X para realizar la cuantificación.

En cuanto a la evaluación de la inoculación bacteriana, este procedimiento se realizó a partir de un medio libre de nitrógeno (NFb). Para la prueba, se utilizó 1 g de raíz de cada uno de los tratamientos y una vez listo el medio de cultivo, fue colocada una muestra de raíz y se maceró dentro de un tubo de ensayo con ayuda de una varilla de agitación para finalmente añadir el medio de cultivo. Aproximadamente después de 72 horas, el medio de cultivo indicó mediante la formación de una película blanca aproximadamente a 2 mm de la superficie la existencia de *Azospirillum brasiliense*.

Durante el experimento se crearon bases de datos en Excel, se actualizó periódicamente y al finalizar la etapa experimental, se introdujeron los datos al programa InfoStat para el análisis estadístico, aplicando pruebas de normalidad y comparaciones entre tratamientos para observar si hubo diferencias significativas al finalizar el experimento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se registró que la densidad aparente y real, después de 31 semanas, obtienen cambios, contribuyendo a que el porcentaje de espacio poroso inicial de 36% incrementara con cada

uno de los tratamientos, siendo el más destacado el tratamiento con HMA (Cuadro 1), sin embargo, no representan diferencias significativas.

El pH fue ligeramente alcalino y, de acuerdo con los datos del Cuadro 1, presenta una diferencia significativa en el tratamiento HMA contra el resto. Asimismo, se determinó que la clase textural del sustrato es franco-arcilloso arenoso, indicando una capacidad equilibrada para formar estructuras estables, aireación y mantener una temperatura moderada.

Cuadro 1. Promedios en resultados en suelo

Parámetro	Testigo	HMA	A. brasiliense	HMA + A. brasiliense	Valor p
Densidad aparente g/cm^3	1.353 ±0.01	1.286 ±0.01	1.33 ±0.01	1.29 ±0.01	>0.05
Densidad real g/cm^3	2.239 ±0.06	2.311 ±0.06	2.275 ±0.06	2.275 ±0.06	>0.05
% Espacio poroso	39.54 ±1.67	44.253 ±1.67	41.446 ±1.67	43.253 ±1.67	>0.05
pH activo	7.566 ±0.03	7.266* ±0.03	7.533 ±0.03	7.46 ±0.03	<0.05

Nota. Donde * indica una diferencia significativa con respecto al resto de los tratamientos.

El porcentaje de supervivencia no fue afectado por los tratamientos. En estudios como los de González-Gómez *et al.* (2023) y Simancas-Ortiz (2007), la combinación de HMA y *A. brasilense* no varió el porcentaje de colonización micorrízica en *Ocimum basilicum* L. y *A. salmiana* respectivamente: En este estudio se registró una colonización micorrízica de 80% en el tratamiento con HMA y la doble inoculación tuvo 61%.

Cuadro 2. Resultados en parámetros registrados del cultivo de *A. salmiana*.

Parámetro	Testigo	HMA	A. brasiliense	HMA + A. brasiliense	Valor p
Altura (cm)	7.758 ±0.52	8.708 ±0.52	8.684 ±0.52	8.75 ±0.52	>0.05
Cobertura (cm)	48.50 ±9.01	61.855 ±9.01	54.857 ±8.65	69.893 ±9.01	>0.05
Número de pencas	6.75 ±0.24	7.17* ±0.24	6.08* ±0.24	6.5 ±0.24	**<0.05**
TCR altura (1/días)	0.0069* ±0.001	0.0073 ±0.001	0.0089 ±0.001	0.0090* ±0.001	**<0.05**
Potencial hídrico (MPa)	-0.25 ±0.05	-0.20 ±0.05	-0.22 ±0.05	-0.34 ±0.05	>0.05
Eficiencia en el uso del agua (g/L)	0.2936 ±0.02	0.3108 ±0.02	0.3288 ±0.02	0.3414 ±0.02	>0.05
Biomasa (g):					
Raíz húmeda	0.53 ±0.09	0.66 ±0.09	0.73 ±0.09	0.50 ±0.09	>0.05
Vástago húmedo	13.13 ±1.24	15.40 ±1.24	17.30 ±1.24	16.50 ±1.24	>0.05
Raíz seca	0.073 ±0.01	0.090 ±0.01	0.093 ±0.01	0.076 ±0.01	>0.05
Vástago seco	1.013 ±0.07	1.060 ±0.07	1.066 ±0.07	1.186 ±0.07	>0.05
Cociente r/v	0.0748 ±0.01	0.083 ±0.01	0.0882 ±0.01	0.0649 ±0.01	>0.05

Nota. Donde * indica una diferencia significativa con respecto al resto de los tratamientos.

TCR: tasa de crecimiento relativo. Cociente r/v: cociente raíz/vástago de biomasa seca.

En cuanto a la TCR, el tratamiento con doble inoculación mostró diferencias significativas con respecto a los otros tratamientos, coincidiendo con los estudios de Simancas-Ortiz (2007). Con respecto al número de pencas, el tratamiento con HMA presentó un mayor número en comparación a los otros tres tratamientos y disminuyó este parámetro en presencia de *A. brasiliense,* contrastando con el mencionado estudio, donde

el número de pencas de *A. salmiana* se incrementa en plantas que presentan doble inoculación. Ver el Cuadro 2 donde se muestran los resultados al final del experimento. También, es importante considerar que la esperanza de vida de *A. salmiana* es de 20 años por lo que su crecimiento es muy lento.

CONCLUSIONES

Se concluye que la doble inoculación favorece un aumento significativo en la tasa de crecimiento relativo en altura de *A. salmiana* comparado con los otros tratamientos. También, el número de pencas incrementa significativamente con la inoculación de hongos micorrizógenos arbusculares, respecto a los otros tratamientos, donde se observa que aquellos con *A. brasilense* mostraron un menor número de pencas.

Finalmente, la inoculación de plántulas de *A. salmiana*, tanto con HMA y *A. brasilense*, puede representar una estrategia para la propagación por semilla de esta especie y para la producción de plantas destinadas a programas de rehabilitación ecológica de la vegetación en ambientes semiáridos. Sin embargo, se recomienda analizar a mayor profundidad el estudio de la simbiosis múltiple entre HMA y bacterias fijadoras de nitrógeno de vida libre, como *A. brasilense* y plantas de *A. salmiana*.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo para este estudio de parte del proyecto DGAPA-PAPIME PE206124.

BIBLIOGRAFÍA

Aguilera-Gómez, L. I., Olalde-Portugal, V., Arriaga, M. R. & Contreras-Alonso, R. (2007). Micorrizas arbusculares. *CIENCIA ergo-sum, 14*(3), 300-306.

Carrillo-Saucedo, S., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S. & Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica, *Acta botánica mexicana*, (129).

García-Mendoza, A. (2007). Los agaves de México. *Ciencias* (87), 14-23.

González-Gómez, H., Juárez-López, P., Quiñones-Aguilar, E. E., Rincón-Enríquez, G., Alia-Tejacal, I., Ramírez-Trujillo, J. A., López-Martínez, V., Villegas-Torres, O.G., & Aguilar-Carpio, C. (2023). Crecimiento de albahaca *(Ocimum basilicum L.*) 'Sweet Nufar' inoculada con hongos micorrícicos arbusculares y *Azospirillum brasilense. Revista Chapingo. Serie horticultura*, *29* (1), 39-52. https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2022.03.005

Jehani, M.D., Singh, S., Archana, T.S., Kumar, D. & Kumar, G. (2023). *Azospirillum – a free-living nitrogen-fixing bacterium*. En Parray, J., Shameem, N., Egamberdieva, D. & Sayyed, R. (Eds.) *Rhizobiome. Ecology, Management and Application.* (pp. 285-308). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-16030-1.00001-8

Llorente, B., Alasia, M. y Larraburu, E. (2016). Biofertilization with *Azospirillum brasilense* improves *in vitro* culture of *Handroanthus ochraceus*, a forestry, ornamental and medicinal plant. *New Biotechnology, 33* (1), pp. 32-40.

Rodrígues, K.M. & Rodrígues, B.F. (2019). Arbuscular Mycorrhizae: Natural Ecological Engineers for Agro-Ecosystem Sustainability. En Singh, J.S., & Singh, D. (eds.) *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering: Microbial Biotechnology in Agro-environmental Sustainability* (pp. 165-175) Elsevier,

Simancas-Ortiz, J. E. (2007). Influencia de Hongos Micorrízicos Arbusculares y de *Azospirillum brasilense* y de su interacción sobre el desarrollo de plántulas de maguey (*Agave salmiana* var. *salmiana*) en condiciones de invernadero. [Tesis]. UNAM, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

Tarango-Arámbula, L. A. (2005). Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas a semiáridas de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 6 (2), pp. 17-21.

EFECTO DE LA COBERTURA DE RASTROJO EN EL RENDIMIENTO DEL TOMATE CHERRY BAJO CONDICIONES DE INVERNADERO

Perla Nayelli Cruz Martínez [1]; María Socorro Orozco Almanza[1]; María Magdalena Ordoñez Reséndiz[1]; Roberto Ramos González[1]; María de Jesús Rojas Cortés[1]

[1] Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, UNAM, Batallón 5 de Mayo, S/N esquina Fuerte de Loreto, Colonia Ejército de Oriente, Alcaldía Iztapalapa, C.P. 09230, Ciudad de México, México.

Correo del autor de correspondencia: kibamblaq@gmail.com

RESUMEN

La degradación de la estructura física y biológica del suelo puede mitigarse mediante coberturas muertas como los rastrojos. En este estudio se evaluó el efecto del rastrojo de cebada sobre el rendimiento del tomate cherry (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*) y la diversidad de la macrofauna edáfica en invernadero, con dos tratamientos: cobertura y testigo. La cobertura aumentó el rendimiento en 18.34%, mejoró la materia orgánica y la biodiversidad de la macrofauna, registrándose artrópodos benéficos ausentes en el testigo. No se detectaron diferencias significativas en el crecimiento del tomate ni en los grados Brix. Ambos tratamientos resultaron rentables. La cobertura con rastrojo se confirma como una alternativa viable y sustentable para la producción en invernadero, al favorecer el suelo y la fauna edáfica sin comprometer la calidad del fruto.

PALABRAS CLAVE: *Degradación de materia orgánica; fauna edáfica; prácticas sustentables; rastrojo de cebada; sustrato orgánico.*

INTRODUCCIÓN

La degradación física y biológica del suelo agrícola se refleja en pérdida de cobertura, erosión, alteración térmica, reducción de materia orgánica y disminución de biodiversidad edáfica (Lal, 2015). Las coberturas muertas, como rastrojos de gramíneas, conservan humedad, amortiguan lluvias, aportan nutrientes y estimulan la actividad biológica (Blanco-Canqui y Lal, 2009), además de mejorar productividad y favorecer macrofauna benéfica (Giller *et al*., 2009).

El mulching con paja incrementa fertilidad, estructura, ciclo de nutrientes, retención hídrica, regula temperatura, suprime malezas, controla plagas y reduce emisiones de gases de efecto invernadero. Su eficacia depende del método de aplicación, volumen, tipo de suelo y condiciones ecológicas (Liang, 2025). El rastrojo optimiza el uso del agua, promueve materia orgánica y eleva el rendimiento (Du et al., 2022); en agricultura de secano, conserva humedad, regula temperatura, mejora la salud del suelo y reduce erosión, aumentando la producción (Demo y Asefa-Bogale, 2024).

El tomate cherry (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*), de alto valor comercial, exige sustratos de calidad en sistemas intensivos, especialmente en invernaderos. Bajo este contexto, el estudio analizó el efecto del rastrojo de cebada como cobertura muerta sobre el rendimiento del cultivo y la riqueza de macrofauna edáfica, con la hipótesis de que esta

práctica incrementa el rendimiento y promueve la biodiversidad del suelo, contribuyendo a una agricultura más sostenible.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el vivero "Chimalxochipan" de la FES Zaragoza (CDMX) durante primavera-verano. Se sembraron semillas de tomate cherry (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*) en un sustrato de tierra de monte (70%), humus de lombriz (15%) y agrolita (15%). Se establecieron dos parcelas de 1 × 3 m con nueve plantas cada una, abonadas con bocashi (3 kg/m²), manejadas con riego por goteo, tutorado y podas. Una parcela recibió cobertura de rastrojo (Tr) y la otra fungió como testigo (T).

En el sustrato se determinaron: materia orgánica (Walkley y Black), N total (digestión diácida y arrastre de vapor), P (digestión diácida y fotocolorimetría con molibdo-vanadato), K (digestión diácida y espectrofotometría de emisión de flama), Ca, Mg, Fe, Cu y Mn (digestión diácida y espectrofotometría de absorción atómica), B (digestión diácida y fotocolorimetría con azometina-H), relación C/N (cálculo), CIC (acetato de amonio 1.0 N, pH 7.0) y densidad aparente (método de probeta) (Ryan y Rashid, 2001).

La macrofauna edáfica se evaluó mediante muestras compuestas de Tr y T, con identificación taxonómica (Bahena, 2008; Rodríguez del Bosque y Morón, 2010) y cálculo del índice de Margalef (Kunakh *et al.,* 2023). En las plantas se registraron tasa de crecimiento relativo (TCR), floración, rendimiento por planta y parcela, e índice beneficio/costo (B/C). Los datos se analizaron con prueba t de Student ($\alpha = 0.05$) en InfoStat 2022.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al finalizar el ciclo de cultivo, ambas parcelas (T y Tr) mostraron incremento en la materia orgánica y en la relación C/N del sustrato, con valores superiores en el tratamiento con rastrojo (Tr) (M.O. 5.2 %, C/N 8.6) respecto al testigo (T) (M.O. 4.3 %, C/N 7.8). El pH se mantuvo en rango alcalino (~8) y la capacidad de intercambio catiónico fue mayor con rastrojo (25.5 cmol(+)kg^{-1}) que en el testigo (22.9 cmol(+)kg^{-1}). Los macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe) y micronutrientes (Cu, Zn, Mn, B) disminuyeron en ambos tratamientos (Cuadro 1). Estos resultados coinciden con Sánchez (2003), quien reportó mejor mineralización de materia orgánica con cobertura de rastrojo.

En el cultivo de jitomate, los grados Brix y la TCR no mostraron diferencias estadísticas significativas ($p \geq 0.05$). El número de flores y frutos fue mayor en el tratamiento ($p \leq 0.05$), mientras que el rendimiento no presentó diferencias significativas ($p \geq 0.05$). El índice B/C fue rentable tanto para el testigo (T) como para el tratamiento (Tr) (Cuadro 2).

Antes de la siembra del tomate cherry, en el testigo (T) se registraron artrópodos de las clases Arachnida, Malacostraca e Insecta; en el tratamiento con cobertura de rastrojo (Tr) se identificaron artrópodos de las clases Arachnida, Collembola, Insecta, Chilopoda y Clitellata (Annelida).

Cuadro 1. Composición química y nutrimental de los sustratos de cada tratamiento.

Propiedades edáficas	Tratamientos			
	T A	T D	TrA	TrD
M.O (%)	3.0	4.3	3.6	5.2
C/N	6.9	7.8	4.0	8.6
pH	8.0	8.0	7.8	8.2
C.E. (dS/m)	0.38	0.38	0.42	0.43
C.I.C. (cmol(+)kg^{-1})	22.4	22.9	27.3	25.5
D.A (g/cm^3)	1.1	1.1	1.2	1.1
N (%)	0.9	0.7	1.4	0.7
P (%)	0.1	0.1	0.1	0.1
K (%)	0.5	0.5	0.4	0.4
Ca (%)	0.6	0.5	0.5	0.5
Mg (%)	1.8	1.7	1.7	1.4
Na (%)	0.2	0.2	0.2	0.2
Fe (%)	1.2	1.1	1.0	0.9

TA =testigo antes del cultivo; TD = Testigo al momento de la cosecha; TrA = tratamiento con rastrojo antes del cultivo; TrD= Tratamientocon rastrojo al momento de la cosecha.

La fauna edáfica mostró diferencias: antes del cultivo, el testigo (T) presentó mayor diversidad (2.41) que el tratamiento (Tr) (1.84); tras la cosecha, el tratamiento superó al testigo (1.77 vs. 1.55) (Cuadro 2). Se identificaron grupos funcionales como descomponedores primarios (Clitellata: lombrices de tierra; Diplopoda: milpiés) (Lavelle y Spain, 2001); detritívoros (Collembola: colémbolos; Malacostraca: cochinillas de humedad; Symphyla: miriápodos) (Lavelle y Spain, 2001); depredadores (Arachnida: arañas y pseudoescorpiones) (Wise, 1993) y controladores biológicos (Arachnida: arañas; Insecta: crisópidos, coccinélidos y carábidos) (van Lenteren, 2012). Se detectó *Fusarium oxysporum* en ambas parcelas, con menor incidencia en el tratamiento, patógeno que puede ocasionar pérdidas de hasta 60% en el rendimiento (Amaral *et al.*, 2008). Estos resultados sugieren que la cobertura de rastrojo favorece la diversidad biológica.

Cuadro 2.- Atributos del cultivo de tomate Cherry.

Parámetro	Testigo	Tratamiento
Grados Brix	6.0 a *	7.0 a*
Tasa de Crecimiento Relativo (TCR) ($día^{-1}$)	0.09 a	0.10 a
Flores/racimo (No)	12.8 a	16.4 b
Frutos/planta (No)	60.0 a	80.0 b
Rendimiento (kg/m^2)	6.19 a	7.9 a
Índice B/C	1.73	1.47
Índice de Margalef antes del cultivo	2.41	1.84
Índice de Margalef después de la cosecha	1.55	1.77

*Letras iguales entre columnas indican medias sin diferencias estadísticas significativas.

Después de la cosecha, en el testigo (T) se encontraron artrópodos de las clases Malacostraca, Collembola, Insecta, Symphyla, Arachnida, Chilopoda y Clitellata (Annelida). En el tratamiento con rastrojo (Tr) se registraron artrópodos de las clases

Collembola, Diplopoda, Malacostraca, Insecta, Symphyla, Arachnida y Clitellata (Annelida) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Artrópodos presentes por tratamiento.

Muestra	Clase								
Testigo As	M		I		A				
Tratamiento As		C	I		A	Ch	Cl		
Testigo Dc	M	C	I	S	A	Ch	Cl		
Tratamiento Dc	M	C	I	S	A		Cl	D	

As= Antes de la siembra; Dc= Después de la cosecha; M= Malacostraca; C= Colémbola; I= Insecta; S= Symphyla; A= Aráchnida; Ch=Chilopoda; Cl= Clitellata; D=Diplopoda.



Figura 1. Cultivo testigo y tratamieno con cobertura de rastrojo de tomate cherry con hongo *Fusarium oxysporum.*

CONCLUSIONES

La incorporación de rastrojo al sistema productivo mejora el contenido de materia orgánica y la relación C/N. La capacidad de intercambio catiónico se mantiene baja, sin salinizar el sustrato, y el pH permanece estable. Además, incrementa el rendimiento del tomate cherry, resulta rentable y favorece la diversidad de la macrofauna edáfica. Estos resultados confirman su potencial como estrategia sostenible para optimizar la calidad del suelo y fortalecer la biodiversidad funcional en agroecosistemas.

AGRADECIMIENTOS

Al Programa de apoyo para la innovación y mejoramiento de la enseñanza, DGAPA, UNAM, por haber financiado este estudio dentro del proyecto "Generación de paquetes biotecnológicos para la producción de hortalizas orgánicas" (PE 203715).

BIBLIOGRAFÍA

Amaral, D.O.J., Magalhaes, M., Vilela, L., Vanusa, M. (2008). Differential gene expression induced by salycilic acid and *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* infection in tomato. *Pesq. Agrop. Bras.* 43(8): 1017-1023.

Bahena, J.F. (2008). Enemigos naturales de las plagas agrícolas. Del maíz y otros cultivos. Libro Técnico Núm. 5. SAGARPA–INIFAP, Uruapan, Michoacán, México. 180 p.

Demo, A.H. & Asefa-Bogale, G. (2024). Enhancing crop yield and conserving soil moisture through mulching practices in dryland agriculture. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1361697. https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1361697.

Du, C., Li, L. & Effah, Z. (2022). Effects of straw mulching and reduced tillage on crop production and environment: A review. *Water*, 14(16), 2471. https://doi.org/10.3390/w14162471.

Giller, K. E., Witter, E., Corbeels, M. & Tittonell, P. (2009). Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view**.** ***F****ield Crops Research,* 114(1), 23–34. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.017

Kunakh, O.M., Volkova, A.M., Tutova, G.F. & Zhukov, O.V. (2023). *Diversity of diversity indices: Which diversity measure is better?* Biosystems, (publicación en línea).

Lal, R. (2015). Restoring soil quality to mitigate soil degradation. Sustainability, 7(5), 5875–5895. https://doi.org/10.3390/su7055875.

Lavelle, P. & Spain, A.V. (2001). *Soil Ecology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands. 654 p.

Liang, M. (2025). Protective effects of straw mulching on soil health and function: A review. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 37(1), 1–12.

Rodríguez del Bosque, L.A., & Morón, M.A. (eds.). 2010. Plagas del suelo. 1. ed. Mundi-Prensa, México, D.F., México. 417 p.

Ryan, J. E., G. & Rashid, A. (2001). *Soil and plant analysis laboratory manual* (2nd ed.). Aleppo, Syria: International Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA). 172 p.

Sánchez, R. (2003). Efecto de los rastrojos sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo vertisol y rendimientos de caña de azúcar (Saccharum officinarum L) en Tabasco, México. *Interciencia*, 404-407.

van Lenteren, J.C. (2012). The state of commercial augmentative biological control: plenty of natural enemies, but a frustrating lack of uptake. *BioControl* 57: 1–20.

Wise, D.H. (1993). Spiders in ecological webs. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 328 p.

IMPACTS OF NANOPLASTIC SOIL POLLUTION ON BIOLOGICAL NITROGEN FIXATION AND PHYSIOLOGY OF *GLYCINE MAX* INOCULATED WITH *Bradyrhizobium diazoefficiens*

Luciana Cristina Vitorino[1,2]; Layara Alexandre Bessa[1,2]; Thais Cristina Sousa Oliveira[2]

[1] Laboratory of Agricultural Microbiology, Instituto Federal Goiano, Rio Verde Campus, Rodovia Sul Goiana, Km 01, Rio Verde 75901-970, GO, Brazil;
[2] Laboratory of Metabolism and Genetics of Biodiversity, Instituto Federal Goiano, Rio Verde Campus, Rio Verde.

Correo del autor de correspondencia: luciana.vitorino@ifgoiano.edu.br

ABSTRACT

Nanoplastic pollution has emerged as a significant threat to environmental productivity, with growing evidence that soils worldwide are accumulating substantial amounts of these pollutants. Given that nanoplastics are known to disrupt the biomass and metabolic activity of soil microbiota, we hypothesized that polystyrene nanoparticles could adversely affect nodulation and biological nitrogen fixation (BNF) mediated by the rhizobacterium *Bradyrhizobium diazoefficiens*, one of the most widely used agricultural inoculants globally. To test this hypothesis, we conducted a series of in vitro and greenhouse experiments to assess the effects of varying concentrations of nanoplastics (0, 0.1, 1, 10, and 100 µg L^{-1}) on the viability of *B. diazoefficiens* cells and their symbiotic interaction with *Glycine max*. The viability of *B. diazoefficiens* decreased linearly with increasing nanoplastic concentrations. Similarly, exposure to nanoplastics negatively impacted *G. max* growth, reducing plant height, root length, and nodule formation by *B. diazoefficiens*. Plants inoculated with *B. diazoefficiens* and exposed to nanoplastics exhibited decreased biomass accumulation and impaired physiological parameters, including transpiration rate (*E*), photosynthetic rate (*A*), and stomatal conductance (*gs*). These findings suggest that nanoplastics can hinder plant development and symbiotic interactions, potentially compromising agricultural productivity.

KEYWORDS: *BNF; nanopollutants; rhizobacteria; vegetable production.*

INTRODUCTION

Microplastic (ranging from 100 nm to 5 mm) and nanoplastic (< 100 nm) pollution has recently emerged as a global environmental concern due to their widespread distribution (de Souza Machado *et al.*, 2018; da Costa *et al.*, 2017). Agricultural lands in regions such as the Americas, Europe, and Australia have become hotspots for microplastic contamination, receiving several metric tons of these pollutants annually (Iqbal *et al.*, 2020).

Micro and nanoplastic particles enter agricultural soils through various pathways, including nano-coated seeds treated with fertilizers and pesticides (Heuchan *et al.*, 2019), the application of organic fertilizers such as sewage sludge (Corradini *et al.*, 2019), and irrigation with contaminated surface water or wastewater (Bläsing and Amelung, 2018;

Zhang and Liu, 2018). Among the most commonly detected plastic polymers in these soils are polyethylene, polystyrene, and polypropylene (Piehl *et al.*, 2018), which pose emerging challenges to sustainable agricultural production. Despite increasing awareness, most current research remains focused on the detection and quantification of micro and nanoplastics in soil systems.

Given this context, we hypothesized that nanoplastic particles may interfere with the plant growth-promoting activity of agronomically important rhizobacteria. To test this hypothesis, we used *Bradyrhizobium japonicum*, a bacterium widely applied in agriculture to enhance the productivity of major crops such as soybean, common bean, cowpea, and various grasses (e.g., maize, wheat, and sugarcane) through biological nitrogen fixation (BNF). The objective of this study was to evaluate the effects of polystyrene nanoplastics in soil on the symbiotic interaction between *Glycine max* and *B. japonicum*, with emphasis on how this emerging pollutant influences plant–microbe dynamics.

MATERIALS AND METHODS

The experiment was conducted in a greenhouse at the Metabolism and Genetics of Biodiversity Laboratory of the IFGoiano – Campus Rio Verde. A 1:1 mixture of soil and sand was used, with the soil classified as a dystrophic Red Latosol. Prior to use, the soil was sterilized and treated with different concentrations of polystyrene nanoplastic (0, 0.1, 1, 10, and 100 µg L^{-1}). *Glycine max* seeds were surface-sterilized and inoculated with *B. diazoefficiens* at a cell concentration of 10^8 CFU mL^{-1}. The seeds were sown in 3-liter pots filled with the prepared substrate. Six seeds were planted per pot, and thinning was performed at the VC growth stage (cotyledon), leaving two plants per pot. Plants were irrigated daily until the R1 stage (beginning of flowering), when evaluations were conducted.

Biometric measurements included plant height (cm), root length (cm), and number of root nodules. Gas exchange parameters were measured between 7:00 and 10:00 AM using an infrared gas analyzer (IRGA) equipped with an integrated fluorometer (model LI-6800XT, LI-COR Inc., Lincoln, USA). The following parameters were recorded: net photosynthetic rate (A, µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), transpiration rate (E, mmol H_2O m^{-2} s^{-1}), and stomatal conductance (Gsw, mol H_2O m^{-2} s^{-1}).

Data were analyzed using ANOVA to assess the effects of nanoplastic treatments compared to the control group (0.0 µg L^{-1}). When significant differences were detected, Dunnett's post hoc test was applied at a 5% significance level ($p < 0.05$). Results were used to determine the NOEC (No Observed Effect Concentration—the highest concentration at which no adverse effect is observed) and OEC (Observed Effect Concentration—the lowest concentration at which an adverse effect is observed).

RESULTS AND DISCUSSION

Plant height in *G. max* inoculated with *B. diazoefficiens* was significantly reduced in response to polystyrene nanoplastic exposure compared to the control ($F_{4,10} = 20.445$; $p < 0.0001$; NOEC = 0 µg L^{-1}; OEC = 0.1 µg L^{-1}) (Figure 1a). Similarly, root length and nodule

number were also significantly decreased with increasing nanoplastic concentrations ($F_{4,10}$ = 41.657; $p < 0.0001$ and $F_{4,10}$ = 30.693; $p < 0.0001$, respectively; NOEC = 0 µg L^{-1}; OEC = 0.1 µg L^{-1}) (Figures 1b and 1c). Total dry biomass accumulation was likewise negatively affected by nanoplastic exposure ($F_{4,10}$ = 19.651; $p < 0.0001$; NOEC = 0 µg L^{-1}; OEC = 0.1 µg L^{-1}) (Figure 1d).

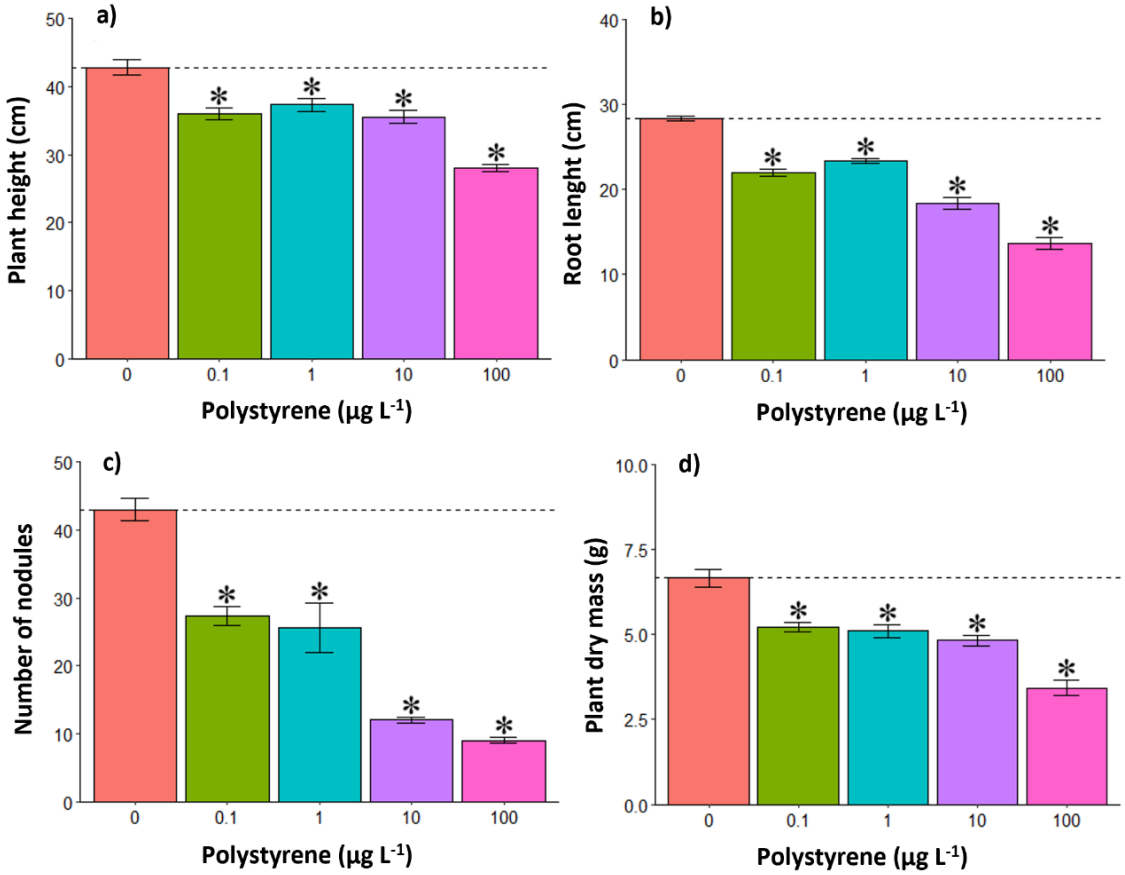


Figure 1. Growth parameters of soybean (*Glycine max* L.) plants inoculated with *Bradyrhizobium diazoefficiens* and exposed to different concentrations of polystyrene nanoplastics. (a) Plant height, (b) root length, (c) number of nodules, and (d) total dry biomass accumulation. Asterisks indicate statistically significant differences compared to the control treatment ($p < 0.05$).

The results observed in *G. max* are consistent with previous studies indicating that nanoplastics can impair plant growth through interactions with biological systems, causing physical and/or chemical stress that compromises both root and shoot development (Shah *et al.*, 2024; Su *et al.*, 2024; Surgun-Acar, 2022). The reduction in root nodule number suggests that nanoplastics may interfere with the symbiotic relationship between *G. max* and *B. diazoefficiens*, potentially affecting nodule formation and, consequently, biological nitrogen fixation (Shoaib *et al.*, 2024; Kim *et al.*, 2023).

Furthermore, the observed decrease in total dry biomass indicates a broader growth limitation in response to nanoplastic exposure, possibly related to metabolic disturbances or nutrient uptake disruption (Su *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2024). In addition, the net photosynthetic rate (*A*) of soybean plants inoculated with *B. diazoefficiens* was significantly affected by polystyrene nanoplastic concentrations ($F_{4,10}$ = 6.216; $p < 0.01$; NOEC = 0.1 µg L^{-1}; OEC = 1 µg L^{-1}) (Figure 2a). Similar effects were observed for transpiration rate (*E*) ($F_{4,10}$ = 5.623; $p < 0.01$; NOEC = 0.1 µg L^{-1}; OEC = 1 µg L^{-1}) and stomatal conductance (*gs*) ($F_{4,10}$ = 7.931; $p < 0.01$; NOEC = 0.1 µg L^{-1}; OEC = 1 µg L^{-1}) (Figures 2b and 2c).

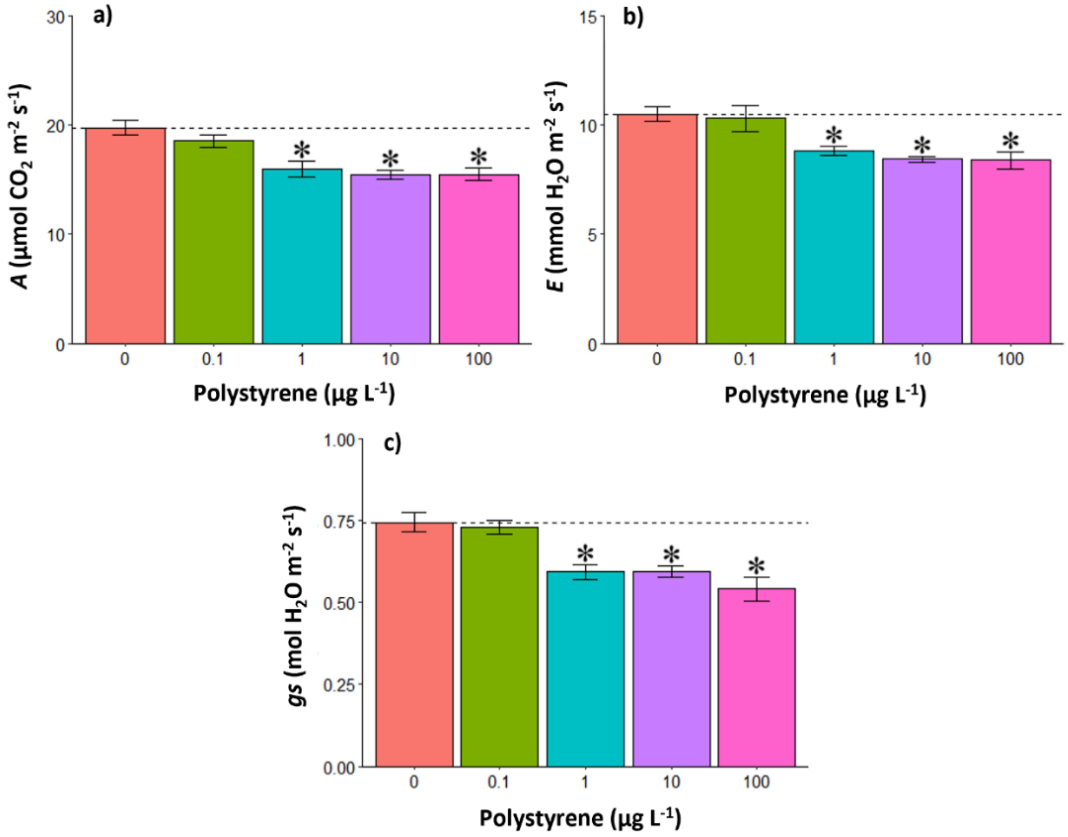


Figure 2. Gas exchange parameters of soybean (*Glycine max* L.) plants inoculated with *Bradyrhizobium diazoefficiens* and exposed to different concentrations of polystyrene nanoplastics. (a) Net photosynthetic rate (*A*), (b) transpiration rate (*E*), and (c) stomatal conductance (*gs*). Asterisks indicate statistically significant differences compared to the control treatment ($p < 0.05$).

The observed reduction in gas exchange parameters suggests that polystyrene nanoplastics may impair the carbon fixation process (Porto *et al.*, 2024; Kráľová and Jampílek, 2023). These findings support the notion that nanoplastics disrupt key physiological processes in plants, potentially by hindering water and nutrient uptake or interfering with cell-to-cell communication (Roy *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2021).

CONCLUSIONS

Our findings confirm the hypothesis that exposure to polystyrene nanoplastics can disrupt the interaction between soybean plants and *B. diazoefficiens*, leading to significant reductions in plant growth, nodule formation, biomass accumulation, net photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance. These results demonstrate that nanoplastics can negatively affect both plant development and symbiotic efficiency, with potential consequences for agricultural productivity. Further research is needed to elucidate the underlying mechanisms of these effects and to evaluate the long-term risks associated with nanoplastic contamination in agroecosystems.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the CAPES, and the Foundation for Research Support of the State of Goiás (FAPEG) for the Doctor's grant awarded to Thais Cristina Sousa Oliveira, and for financing this project through approval in public call 03/2022. The authors also thank the IFGoiano, Rio Verde campus, for the infrastructure and the students involved in the study.

BIBLIOGRAPHY

Bläsing, M. & Amelung, W. (2018). Plastics in soil: Analytical methods and possible sources. *Science of the Total Environment*, 612, 435–442.

Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E. & Geissen, V. (2019). Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal. *Science of the Total Environment*, 671, 411–420.

da Costa, J.P., Duarte, A.C. & Rocha-Santos, T.A.P. (2017). Microplastics eoccurrence, fate and behaviour in the environment. In A.P.T. Rocha-Santos, A.C. Duarte (Eds.). *Comprehensive analytical chemistry* (pp. 1e24). Elsevier, Amsterdam.

de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S. & Rillig, M. C. (2018). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24, 1405–1416.

Heuchan, S. M., Fan, B., Kowalski, J. J., Gillies, E. R. & Henry, H. (2019). Development of fertilizer coatings from polyglyoxylate–polyester blends responsive to root-driven pH change. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(46), 12720–12729.

Iqbal, S., Xu, J., Allen, S. D., Khan, S., Nadir, S., Arif, M. S. & Yasmeen, T. (2020). Unraveling consequences of soil micro- and nano-plastic pollution on soil–plant system: Implications for nitrogen (N) cycling and soil microbial activity. *Chemosphere*, 260, 127578.

Kim, K., Song, I.G., Yoon, H. & Park, J.W. (2023). Sub-micron microplastics affect nitrogen cycling by altering microbial abundance and activities in a soil–legume system. *Journal of Hazardous Materials*, 460, 132504.

Kráľová, K. & Jampílek, J. (2023). Effects of nanoparticles/nanotubes on plant growth. In N.S. Chauhan, S.S. Gil (Eds). *The Impact of Nanoparticles on Agriculture and Soil* (pp. 183-237). Academic Press.

Liu, Y., Ma, B., Chen, W., Schlaeppi, K., Erb, M., Stirling, E., Hu, L., Wang, E., Zhang, Y., Zhao, K., Lu, Z., Ye, S. & Xu, J. (2021). Rhizobium symbiotic capacity shapes root-associated microbiomes in soybean. *Frontiers in Microbiology*, 12, 709012.

Piehl, S., Leibner, A., Loder, M.G.J., Dris, R., Bogner, C. & Laforsch, C. (2018). Identification and quantification of macro- and microplastics on an agricultural farmland. *Scientific Reports*, 8, 17950.

Porto, A. L., Amato, G., Gargano, G., Giambalvo, D., Ingraffia, R., Torta, L. & Frenda, A. S. (2024). Polypropylene microfibers negatively affect soybean growth and nitrogen fixation regardless of soil type and mycorrhizae presence. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 135781.

Roy, T., Dey, T.K. & Jamal, M. (2023). Microplastic/nanoplastic toxicity in plants: An imminent concern. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 27.

Shah, T., Khan, Z., Bacha, Z., Zaffar, Z., Munsif, F., Ahmad, A. & Ahmad, P. (2024). Nanoplastics negatively affect nitrogen assimilation and metabolism in soybean roots more than in nodules. *Scientia Horticulturae*, 338, 113732.

Shoaib, M., Li, G., Arshad, M., Asif, M., Gao, W., Brestic, M., Liu, X., Fan, Y., Chuai, H., Zhang, S., Hu, F., Jiao, J., Li, H., Wo, J. & Zhang, H. (2024). Nanoplastic trigger microbial recruitment and enhance symbiotic interactions with aid of soil enzymes and metabolic pathways while negatively affecting the soybean growth. *SSRN*.

Su, D., Li, W., Zhang, Z., Cai, H., Zhang, L., Sun, Y., Liu, X., & Tian, Z. (2024). Discrepancy of growth toxicity of polystyrene nanoplastics on soybean (*Glycine max*) and mung bean (*Vigna radiata*). *Toxics*, 12(2), 155.

Surgun-Acar, Y. (2022). Response of soybean (*Glycine max* L.) seedlings to polystyrene nanoplastics: Physiological, biochemical, and molecular perspectives. *Environmental Pollution*, 314, 120262.

Wang, B., Yuan, H., Yang, Y., Jiang, Z. & Xi, D. (2025). Toxicological effects and molecular metabolic of polystyrene nanoplastics on soybean (*Glycine max* L.): Strengthening defense ability by enhancing secondary metabolisms. *Environmental Pollution*, 366, 125522.

Zhang, G. & Liu, Y. (2018). The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Science of the Total Environment*, 642, 12–20.

HUELLA HÍDRICA DEL ARROZ EN SISTEMAS AGRÍCOLAS BAJO ESTRÉS HÍDRICO DEL SUELO, MICHOACÁN, MÉXICO

Lenin Ejecatl Medina Orozco[1]; David Ariel Barrales Martínez[2]; José Luis Navarrete Pérez Negrón[1]; Víctor Alfonso Hernández Hernández[1]

[1] Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico del Valle de Morelia, Carretera Morelia Salamanca, km 6.5, C.P. 58100. Morelia, Michoacán, México.
[2] Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco. Calzada del Hueso 1100, Colonia Villa Quietud, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04960, CDMX.

Correo del autor de correspondencia: leninmed@gmail.com

RESUMEN

La producción de arroz en regiones de clima seco enfrenta importantes desafíos por la limitada disponibilidad de agua. En este estudio se estimó la huella hídrica del cultivo de arroz en dos localidades de Michoacán, México: Piedras Blancas y Apatzingán. El objetivo fue cuantificar los componentes azul, verde y gris de la huella hídrica, considerando el volumen total de agua para saturar el suelo. Se utilizó la metodología de la huella hídrica para un cultivo. La evapotranspiración de referencia, el balance de agua en el suelo y la capacidad de almacenamiento se estimaron con los modelos de Thornthwaite, Thornthwaite y Mather y Saxton y Rawls. Debido a la escasa precipitación efectiva y elevadas pérdidas por evaporación, toda el agua disponible para el cultivo procede del riego, por lo que el componente verde se integró como parte del azul. Los resultados indicaron que la huella hídrica total fue menor en Piedras Blancas, 1,468.2 m^3/t, en comparación con Apatzingán de 2,028.8 m^3/t. La huella azul fue el componente dominante en ambos casos, mientras que la huella gris fue de 259.2 m^3/t y 191.8 m^3/t, respectivamente. La estimación de la huella hídrica del arroz en condiciones de clima seco mostró que el componente azul domina el consumo total de agua. Se recomienda utilizar el volumen total de agua requerido para mantener el suelo a saturación y no solo la demanda evapotranspirativa, para reflejar de manera más efectiva el consumo de agua del arroz.

PALABRAS CLAVE: *agricultura de riego; eficiencia en el uso del agua; evapotranspiración; huella hídrica; suelos inundados*

INTRODUCCIÓN

El cultivo de arroz convencional demanda inundación o saturación del suelo permanente o semipermanente, que además sirve como control de arvenses (Fiedrich, 2017). A escala global, la mayor producción de arroz, casi tres cuartas partes de la producción mundial, se realiza en zonas bajas irrigadas, donde la disponibilidad de agua es suficiente para el mantenimiento de las demandas evapotranspirativas (Muthayya, 2014). El cultivo demanda grandes volúmenes de agua de riego, principalmente si no son suelos anegados de manera natural. Por ende, la producción en condiciones de escasez hídrica se verá reflejada en la Huella Hídrica (HH).

En México, la demanda nacional de arroz ronda un millón de toneladas; 80 % son importadas y alrededor del 20% se cubren con la producción nacional. El consumo per cápita para el año 2021 fue de 8.75 kg, con un consumo total de 0.98 Mt^3. Se prevé que el consumo de arroz en México aumente hasta alcanzar 1.37 millones de toneladas para el año de 2030 (SADER, 2024). En el país, a pesar de producir arroz en cerca de 250,000 t $año^{-1}$, representa < 0.026% de la producción global (Medina-Orozco, 2024). México es un importador neto de arroz, debido a que compra casi cuatro veces más arroz que el que se produce en el país (SADER, 2024).

En el estado de Michoacán, el Valle de Apatzingán es, por extensión, el área de riego más importante del estado. En la región el sistema de producción de arroz está basado en el suministro de riego. Los suelos se caracterizan por tener elevada capacidad de retención de agua, altos contenidos de arcilla y, por su condición de planicie, fácilmente inundables. Los antecedentes sugieren que el consumo de agua en arroz es de 4,000 mm aproximadamente, dadas las condiciones de estrés hídrico que presenta la región (Tapia y Muñoz, 1996) donde las condiciones de elevadas temperaturas y escasas lluvias, sugieren altas tasas de evapotranspiración; pero con abundante agua que proviene del Cinturón Volcánico Transmexicano y de la Sierra Madre del Sur, lo que permite una buena irrigación (Medina-Orozco, 2024). Con base en lo anterior, el incremento en la demanda del cultivo de arroz y los programas gubernamentales de fortalecimiento al cultivo, favorecerán el aumento en su producción y en el consumo de agua, frente a un decremento del recurso hídrico con base en las predicciones futuras para la disponibilidad del agua.

Por otro lado, la disminución de la productividad del arroz, en la mayoría de los casos, se atribuye a diversas tensiones abióticas, incluida la sequía. El estrés por sequía se ha convertido en una grave amenaza que reduce el crecimiento y desarrollo de las plantas. La sequía favorece el incremento en la salinidad del suelo que repercute en la inhibición del desarrollo de los meristemos y yemas, pérdida de turgencia, caída de hojas, entre otras, hasta que muere la planta (Reddy *et al*., 2017).

Una herramienta de gran utilidad para estimar la HH es el modelado. Para obtener buenos resultados, es necesario contar con datos de campo o bajo condiciones controladas que permitan parametrizar el modelo. Un programa utilizado ampliamente en estimaciones de la HH es AquaCrop, modelo de simulación de crecimiento de los cultivos y consumo de agua. Sin embargo, requiere de información climática gestionada con el modelo CLIMWAT 2.0, con variables no disponibles en las estaciones regionales y que son usados, para estimar datos evapotranspirativos del cultivo mediante el modelo Penman-Montheith (Hoekstra *et al*., 2012). Una alternativa a lo anterior, son los modelos teóricos que requieren de una cantidad de variables mínima para estimar la evapotranspiración (Ghiat *et al*., 2021).

El objetivo del presente estudio fue cuantificar los componentes azul, verde y gris de la huella hídrica, considerando el consumo de volumen total de agua para saturar el suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio se consideró el Valle de Apatzingán-Tepalcatepec, Michoacán, región con condiciones de clima muy cálido, seco y temperaturas medias anuales > 22 °C y lluvias en verano. Para la estimación de la HH se consideró un cultivo de arroz palay del tipo Milagro filipino que es sembrado bajo sistema de riego rodado hasta alcanzar la saturación del suelo. De acuerdo con la cartografía, los Vertisols son dominantes y presentan profundidad efectiva > 100 cm con alta capacidad de almacenamiento hídrico > 200 mm mes^{-1}. La información del suelo se obtuvo del reverso de las cartas edafológicas E13B48 Apatzingán y la E13B47 Tepalcatepec, edición 1982, escala 1:50,000. El período de análisis comprendió un ciclo agrícola típico de primavera-verano que abarca 120 días (Tapia y Muñoz, 1996; Álvarez-Hernández *et al*., 2022).

Para el cálculo de la huella hídrica del cultivo se siguió la metodología propuesta por Hoekstra *et al*. (2012), mediante la estimación de los componentes verde, azul y gris de la huella hídrica del proceso (HHproducción de arroz), expresados en m^3 t. El componente verde corresponde al volumen de agua de lluvia almacenado en el suelo y utilizado por el cultivo; el componente azul representa el agua de riego consumida por evapotranspiración; y el componente gris se refiere al volumen necesario para diluir la carga de contaminantes, principalmente fertilizantes, hasta cumplir con los estándares de calidad del agua. La estimación de los componentes verde y azul del uso de agua del cultivo (UAC, m^3 ha^{-1}) se estimó a partir de la evapotranspiración mensual para un ciclo de 120 días. Ambos componentes, verde y azul, se dividieron entre el rendimiento promedio del cultivo (R, t ha^{-1}). Los rendimientos promedio para las localidades estudiadas fueron de 10.5 t ha^{-1} y de 9.0 t ha^{-1} en Piedras Blancas y Apatzingán, respectivamente. Para la determinación del componente gris se consideró una dosis de N de 120 kg ha^{-1} y un valor de concentración máxima permitida de 11 mg L^{-1} para $N\text{-}NO_3^-$ y de 0 para la concentración natural del contaminante. En este estudio, la estimación de la huella hídrica azul del cultivo de arroz consideró el volumen total de agua aplicada al campo, incluyendo no sólo la evapotranspiración del cultivo (ETc), sino también el agua utilizada para saturar el perfil del suelo. Esta aproximación se justifica debido a que dichos volúmenes representan extracciones efectivas del recurso hídrico, especialmente en sistemas de riego continuo donde el suelo permanece inundado durante gran parte del ciclo, en contraste con la propuesta de Hoekstra *et al*. (2012).

La estimación la evapotranspiración (ETP) ajustada fue con base en Thornthwaite (1948), el balance hídrico del suelo con la propuesta de Thornthwaite y Mather (1955) y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo con el modelo de Saxton y Rawls (2006). Los datos climáticos fueron obtenidos de las normales climatológicas reportadas en las estaciones locales; Piedras Blancas en Buenavista y de Apatzingán de la red del Servicio Meteorológico Nacional.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la huella hídrica del cultivo de arroz permitió identificar contrastes relevantes en el uso del recurso hídrico, tanto en cantidad como en eficiencia. Los

resultados muestran que la huella hídrica total fue menor en Piedras Blancas, con un valor de 1,468.2 m^3 t^{-1}, en comparación con los 2,028.8 m^3 t^{-1} registrados en Apatzingán (Cuadro 1). Sin embargo, muy por debajo de los valores basados en el consumo de agua para riego de 4000 mm reportados por Tapia y Muñoz (1996). En ambos sitios, el componente predominante fue la huella hídrica azul, debido a que el cultivo depende prácticamente por completo del riego. Por este motivo, la huella hídrica verde se consideró nula y toda el agua consumida por el cultivo se integró al componente azul. En el caso de Piedras Blancas, la huella hídrica azul fue de 1,209 m^3 t^{-1}, mientras que la huella gris fue de 259.2 m^3 t^{-1}. En Apatzingán, la huella azul de 1,837 m^3 t^{-1} refleja una mayor demanda de riego, posiblemente asociada a las condiciones climáticas más secas. La huella gris fue ligeramente menor, con 191.8 m^3 t^{-1}, lo cual puede explicarse por las diferencias en los rendimientos.

Cuadro 1. Estimación de huella hídrica para el cultivo de arroz para la región de estudio.

Localidad	**Rendimiento (t ha^{-1})**	**Huella hídrica azul (m^3 t^{-1})**	**Huella hídrica verde (m^3 t^{-1})**	**Huella hídrica gris (m^3 t^{-1})**	**Huella hídrica total (m^3 t^{-1})**
Piedras Blancas (Tepalcatepec)	10.5	1,209	0	259.2	1,468.2
Apatzingán	9.0	1,837	0	191.8	2,028.8

De acuerdo con Hoekstra *et al*. (2012) en su propuesta original para calcular la HH, sugieren que adicionar en el cálculo, el volumen de agua para mantener la lámina superficial y recuperación por percolación puede conducir a una sobreestimación de la huella hídrica, dado que estos flujos no representan pérdidas reales desde la perspectiva del balance hidrológico del sistema. En contraste, diversos estudios han señalado que, en el caso del arroz cultivado bajo condiciones de inundación, y por ser una planta semiacuática, el volumen de agua requerido para saturar el suelo y mantener una lámina superficial permanente, debe de considerarse como el consumo total del cultivo y es parte integral de la huella hídrica, incluyendo los volúmenes de las pérdidas por percolación y los de reposición, para reflejar con mayor precisión, la presión sobre las fuentes disponibles de agua (Islam *et al*., 2024, Li *et al*., 2024; Mialyk *et al*., 2024).

CONCLUSIONES

La estimación de la huella hídrica del arroz en condiciones de clima seco evidenció que el componente azul predomina en el consumo total de agua, debido a la ausencia o baja precipitación efectiva y a las elevadas pérdidas por evaporación. En ambos sitios de estudio, el agua presente en el suelo provino exclusivamente del riego. Piedras Blancas registró una huella hídrica total menor 1,468.2 m^3 t^{-1}, asociada a un mayor rendimiento, mientras que Apatzingán presentó un consumo más elevado por tonelada producida 2,028.8 m^3 t^{-1}. El enfoque que emplea el volumen de saturación del suelo como

equivalente al requerimiento hídrico del cultivo coincide con un cuerpo creciente de investigaciones que proponen estimar la huella hídrica del arroz considerando no solo la evapotranspiración del cultivo, sino también el volumen total de agua necesario para mantener la saturación o inundación, a fin de reflejar de manera más realista la presión ejercida sobre los recursos hídricos.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez-Hernández, J. C., Tapia-Vargas, L.M., Hernández-Aragón, L., Tavitas-Fuentes, L. & Apaez-Barrios, M. (2022). Potencial productivo del arroz 'Lombardía FLAR 13' genotipo de grano largo y delgado de la zona arrocera de Michoacán. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(6), 1117-1127.

Friedrich, T. (2017). Manejo sostenible de suelo con Agricultura de Conservación. Significado para el cultivo de arroz. *Revista Ingeniería Agrícola*, 7(1), 3-7.

Ghiat, I., Mackey, H.R. & Al-Ansari, T. (2021). A review of evapotranspiration measurement models, techniques and methods for open and closed agricultural field applications. *Water*, 13(18), 2523.

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. & Mekonnen, M.M. (2012). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge. 203 pp.

Islam, M.T., Amin, M. M., Islam, D., Jahan, N. & Rahman, M. (2024). Partitioning water footprints of rice for assessing their implications in the face of climate change in Bangladesh. *Paddy and Water Environment*, 22(4), 661-674.

Li, S., Zhuang, Y., Liu, H., Wang, Z., Zhang, F., Lv, M. & Zhang, L. (2023). Enhancing rice production sustainability and resilience via reactivating small water bodies for irrigation and drainage. *Nature Communications*, 14(1), 3794.

Medina-Orozco, L. E. (2024). *Huella hídrica en cultivos agrícolas del estado de Michoacán*. 177 pp. TecNM.

Mialyk, O., Schyns, J.F., Booij, M.J., Su, H., Hogeboom, R.J. & Berger, M. (2024). Water footprints and crop water use of 175 individual crops for 1990–2019 simulated with a global crop model. *Scientific Data*, 11, 206.

Muthayya, S., Sugimoto, J. D., Montgomery, S., & Maberly, G.F. (2014). An overview of global rice production, supply, trade, and consumption. *Annals of the new york Academy of Sciences*, 1324(1), 7-14.

Reddy, I.N.B.L., Kim, B.K., Yoon, I.S., Kim, K.H. & Kwon, T. R. (2017). Salt tolerance in rice: focus on mechanisms and approaches. *Rice Science*, 24(3), 123-144.

SADER. (2024). *Información básica sobre el arroz*. Encuentros para la Creación de Redes de Colaboración para la Soberanía Alimentaria. San Francisco de Campeche, Campeche, 2024.

Saxton, K.E. & Rawls, W.J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science society of America Journal*, 70(5), 1569-1578.

Tapia Vargas L.M. & A. Muñoz Villalobos. (1996). Manejo del agua de riego y su efecto en la productividad del arroz en el valle de Apatzingán, Michoacán. *Agric . Téc . Méx.*, 22(2): 157-174

Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.

Thornthwaite, C.W. & Mather, J.R. (1957). Instructions and Tables for the Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance, *Publications in Climatology* X(3):311.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (CE) Y pH DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA CUENCA DEL RÍO PÁNUCO

Brenda Paola Ortiz Grabillo[1]; Héctor Manuel Ortega Escobar[1]; Carlos Ramírez Ayala[1]; Abdul Khalil Gardezi[3]; Adriana Camacho Ballesteros[3]

[1] Colegio de Postgraduados, Posgrado en Hidrociencias, Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Edo. de México, C.P. 56230, México.

[3] CBTis No. 147, Academia de Ciencias Naturales, Calle Carrillo Flores No. 100, Col. Enrique Velasco Ibarra, Acámbaro, Guanajuato, México.

Correo del autor de correspondencia: ortiz.brenda@colpos.mx

RESUMEN

En la actualidad, el uso de aguas residuales es indispensable para solventar el riego de miles de hectáreas a lo largo de México. Una de las principales redes hidrográficas utilizadas con este propósito es la de la cuenca del Río Pánuco, la cual es utilizada para el transporte de grandes volúmenes de agua residual procedentes del Valle de México. Agua con la que se irrigan grandes zonas intermontanas del Valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, y posteriormente sigue su curso a través de los ríos Tula, Moctezuma y Pánuco, hasta su desembocadura en el Golfo de México. El objetivo de esta investigación fue realizar un diagnóstico preliminar de la calidad del agua con fines de riego, por medio de la evaluación de los parámetros de la conductividad eléctrica (CE) y el pH. El muestreo se realizó en 92 estaciones a lo largo de la red hidrográfica de la cuenca. Se realizó el análisis de los parámetros de CE y pH. Los resultados mostraron valores de CE de 321.45 a 2,565.5 µS cm-1, y pH de 6.80 a 8.83. Bajo la calificación de Richard (1973), el 84.95% de las muestras según su CE muestran que son aptas para riego, siempre y cuando se haga un buen manejo del suelo y del drenaje. Por el criterio de pH, alrededor del 90% de las muestras resultaron aptas para riego agrícola.

PALABRAS CLAVE: *Agua; calidad; riego; salinidad; suelo.*

INTRODUCCIÓN

El uso de aguas residuales se ha intensificado en los últimos años como estrategia para mitigar la escasez hídrica e intensificar la producción agrícola en zonas donde la precipitación es limitada. Esta práctica ha permitido reducir el uso del recurso hídrico y la dependencia de los fertilizantes (Contreras et al., 2017). No obstante, el riego continuo y desmedido con este tipo de agua ha fungido como detonante para que los suelos irrigados presenten problemas de salinización o sodificación, los cuales afectan directamente a sus propiedades físicas y químicas (Tunc y Sahin, 2015). Estos impactos pueden derivar en una disminución en la productividad y funcionalidad de los suelos agrícolas si no se realiza un manejo adecuado (Mau y Porpanto, 2015).

En este contexto, la evaluación de los parámetros fisicoquímicos como la CE y el pH funciona como indicadores clave al inicio de cualquier caracterización de la calidad del agua para riego agrícola. La CE permite estimar la concentración total de sales disueltas, por lo que, funciona como un indicador directo del nivel de salinidad del agua y, por ende, del riesgo de salinización de los suelos (Allison *et al.*, 1974; Rhoades *et al.*, 1999). Por su parte, el pH permite estimar la actividad del ion hidrógeno (Allison *et al.*, 1974), lo que influye directamente en el grado de acidez o alcalinidad en el agua, por lo tanto, afecta directamente a la disponibilidad y la solubilidad de compuestos químicos, principalmente en el comportamiento de los iones, generando toxicidad o deficiencias nutricionales en los cultivos.

La cuenca del río Pánuco es una de las más importante del país, ya que además de ser una de la más grandes, con un área de 84,956 km² (Del Ángel y Domínguez, 2015); funciona como el canal principal de desagüe para el drenaje de la ciudad de México, trasportando hasta cerca de 20,329 millones de m³ de agua anuales hasta su desembocadura en el Golfo de México (Del Ángel y Domínguez, 2015). Además, esta cuenca abastece a más de 85,000 ha de cultivos en el Valle del Mezquital (Peasey *et al.*, 2000).

Dada la relevancia que tiene esta cuenca dentro del sector agrícola y el grado de presión al que se encuentra sometida, el objetivo de esta investigación fue llevar a cabo una evaluación preliminar de la calidad del agua residual en la cuenca del Río Pánuco, por medio de los parámetros de CE y pH, con la finalidad de tener una aproximación de sus posibles efectos en los suelos agrícolas y en los cultivos por su uso.

MATERIALES Y MÉTODOS

La Cuenca del Río Pánuco es una de las regiones hidrológicas más importantes de México, tanto por su extensión como por la cantidad de agua que recibe, lo que la convierte en un componente clave para la gestión hídrica del país. Se encuentra entre los paralelos 19° 00′ y 24° 00′ de latitud norte y los meridianos 97° 45′ y 101° 20′ de longitud este (Carbajal *et al.*, 2020). La cuenca se encuentra dividida en dos subregiones: Alto Pánuco y Bajo Pánuco. El Alto Pánuco corresponde a las cuencas de los ríos Tula y San Juan del Río. Las aguas de ambos ríos se reúnen en la Presa Hidroeléctrica Zimapán, de donde parte el río Moctezuma. Este río pasa por el Cañón del Infiernillo y por la Sierra Madre Oriental. El Bajo Pánuco recibe el flujo de ríos como el Tampaón y Moctezuma, así como el propio Pánuco, hasta que desemboca en el Golfo de

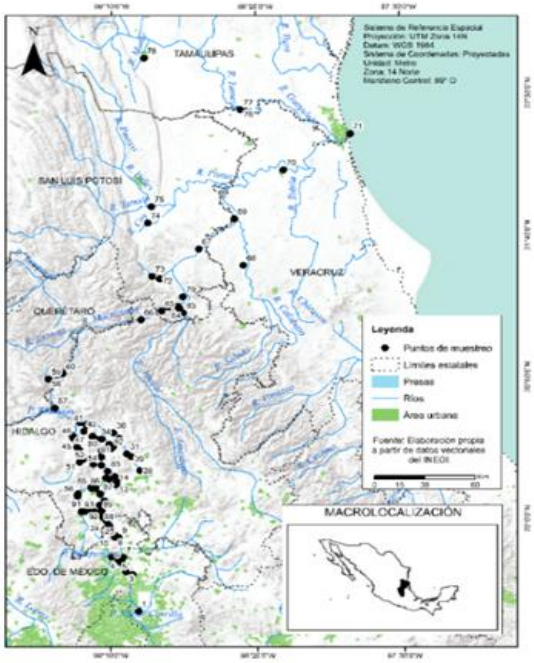


Figura 1. Ubicación de las estaciones de muestreo a lo largo del Alto y Bajo Pánuco.

México (Carbajal *et al.,* 2020). La Cuenca del Río Pánuco es uno de los sistemas hidrológicos más grandes de todo el país. Debido a que es de las cuencas que más agua recibe, es de gran importancia para México a nivel hídrico.

Durante el mes de mayo de 2025, se establecieron 92 estaciones de muestreo a lo largo de la red hidrográfica de la cuenca, distribuidos entre los ríos, canales y presas más significativos. En la figura 1 se muestra su distribución espacial. Las muestras se colectaron en botellas de polietileno de 500 mL, bajo los lineamientos de la norma oficial mexicana NMX-AA-003-SCFI-2019, la cual establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de aguas residuales, con el fin de determinar sus características físicas y químicas. Posteriormente se trasportaron y se trabajaron en el Laboratorio de Ciencias Ambientales y Salinidad en el Posgrado de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos.

Para la determinación de la CE y el pH se utilizaron los métodos de APHA: 2510B y 4500-H+B. Se hizo uso de un potenciómetro modelo 210 y un conductímetro modelo 255. Ambos de la marca de Hanna Instruments.

Para calcular los estadísticos descriptivos de cada variable se utilizó el programa R versión 4.5.0. La graficación de los datos se realizó en el programa de Excel.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra el comportamiento de la CE y del pH en las diferentes estaciones de muestreo. De acuerdo con los estadísticos descriptivos obtenidos del muestreo efectuado a lo largo de red hidrográfica de la cuenca del Río Pánuco (Cuadro 1), la CE obtuvo un valor promedio de 1,624.076 ± 498.558 µS cm^{-1} (Cuadro 1), con un mínimo de 321.45 a 2,565.5 µS cm^{-1}, lo que indica una variabilidad moderada en la salinidad del agua.

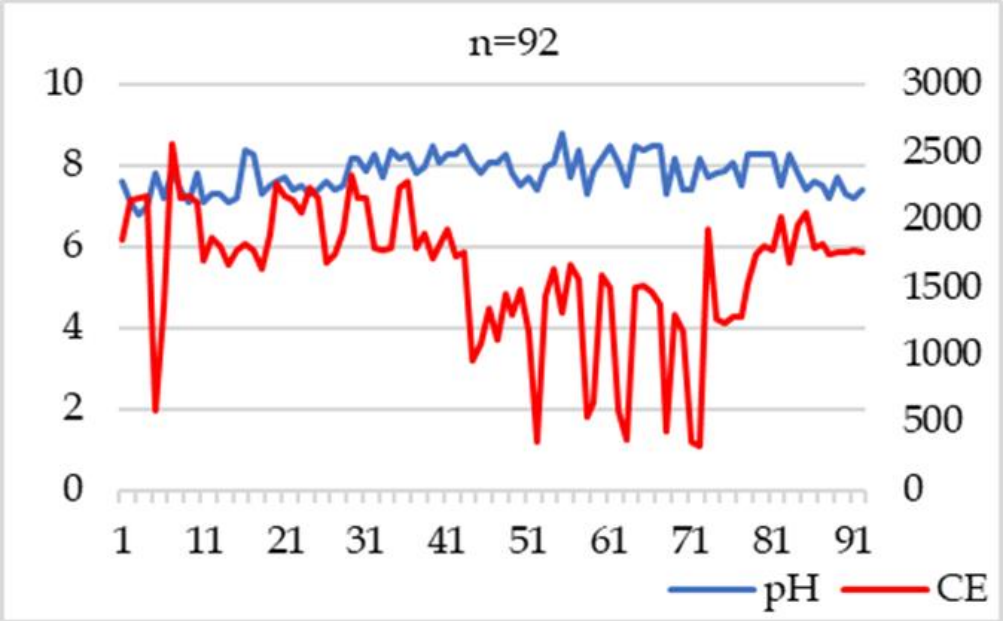


Figura 2. Comportamiento de la CE y del pH en las estaciones de muestreo a lo largo de la cuenca del Pánuco.

Bajo la clasificación de Richards (1973), la mayoría de las muestras (84.95%) presentó una CE entre 750 y 2,250 µS cm^{-1}, lo que indica que las plantas pueden crecer siempre y cuando se haga un bueno manejo del suelo y drenaje. Los restantes 9.68% correspondieron a aguas de buena calidad (CE < 750 µS cm^{-1}), es decir, que son aptas para riego; y el 5.38% presentó un nivel alto de salinidad (CE > 2250 µS cm^{-1}), lo que limita su uso para el riego agrícola.

Algunas investigaciones que se realizaron en zonas muy cercanas en donde se efectuó el muestreo son: la realizada por López et al. (2016), quienes encontraron valores de CE mayores a 750 µS cm-1, desde el Gran Canal del Desagüe hasta la presa Zimapán; Avelar *et al.* (2023b), con valores mayores a 1,000 µS cm^{-1}, en el cauce principal del Río Pánuco; y Pérez *et al.* (2019) con valores de CE de entre 278 a 3,684 µS cm^{-1}.

El valor de pH varió de 6.80 a 8.83, con un promedio de 7.805±0.457, lo que indica baja variabilidad en esta condición química del agua y con tendencia a condiciones alcalinas (pH > 7). Este resultado coincide con lo que reportaron Avelar *et al.* (2023b), quienes observaron valores similares de pH, 6.9 a 8.6, a lo largo del cauce principal del río Pánuco.

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos de la conductividad eléctrica (CE) y del pH en las muestras de agua residual de la cuenca del río Pánuco.

	CE µS cm^{-1}	**pH**
Med	1,624.076	7.805
Mín	321.450	6.800
Máx	2,565.500	8.800
DS	498.558	0.457

En otro estudio realizado por Avelar et al., (2023a) dentro del Valle del Mezquital, parte importante de la red hidrográfica de la cuenca del Pánuco, señalaron datos similares a los obtenidos en el presente trabajo, donde el pH varió entre 6.95 y 9.86. Caso similar ocurre en otro estudio realizado en esta misma zona por Pérez et al. (2019), quienes obtuvieron valores de pH entre 6.95 y 9.86, con condiciones similares de aguas tendientes a la alcalinidad.

De acuerdo con Ayers y Westcot (1985), señalan que los valores de pH en agua de riego varían 6.5 a 8.4. El 90.32% de los valores de pH analizados son menores a 8.4, lo cual indica la mayor proporción de muestras cumple con la calidad necesaria para riego.

CONCLUSIONES

La conductividad eléctrica (CE), al igual que la mayoría de las investigaciones que se han realizado, presenta variaciones semejantes a aquellas que se han hecho en la misma cuenca. Con base en la clasificación de Richards (1973), la calidad del agua que se obtuvo en los puntos de muestreo indica que es apta para riego, siempre y cuando se realice un manejo apropiado del suelo y del drenaje.

Bajo el parámetro de pH, los datos presentan gran similitud con los encontrados en investigaciones de la misma zona. Bajo el criterio de Ayers y Westcot (1985), el 90% de los datos de pH cumplen con la calidad necesaria para riego.

Según el objetivo planteado, se puede concluir que este se cumplió satisfactoriamente, ya que ambos parámetros (CE y pH) permitieron realizar un primer diagnóstico de la calidad del agua de la red hidrográfica de la cuenca del río Panuco y su viabilidad para riego.

AGRADECIMIENTOS

BIBLIOGRAFÍA

Allison, L.E., Brown, J.W., Hayward, H.E., Richards, L.A., Bernstein, L., Fireman, M., Pearson, G.A., Wilcox, L.V., Bower, C.A., Hatcher, J.T. & Reeve, R.C. (1974). Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América, Rama de Investigación sobre Conservación de Suelo y Agua, Servicio de Investigaciones Agrícolas. Editorial Limusa, México.

Avelar-Roblero, J.U., Ortega-Escobar, H.M., Mancilla-Villa, O.R., Ramírez-Ayala, C., Mendoza-Saldívar, I. & Gardezi, A.K. (2023a). Calidad agronómica de las aguas residuales en los distritos de riego Tula y Alfajayucan. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 39(3): 487–499. https://doi.org/10.20937/RICA.54478

Avelar-Roblero, J.U., Ortega-Escobar, H.M., Mancilla-Villa, O.R., Gardezi, A.K., Mendoza-Saldivar, I., Sánchez-Bernal, E.I. & Can-Chulim, Á. (2023b). Variación de la calidad del agua en el cauce principal de la cuenca del río Pánuco. *Terra Latinoamericana*, 41: e1601. https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v41/2395-8030-tl-41-e1601.pdf

Ayers, R.S. & Westcot, D.W. (1985). Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29. FAO, Roma, Italia. ISBN: 92-5-102263-1.

Bockheim, J.G. & Hartemink, A.E. (2013). Distribution and classification of soils with clay-enriched horizons in the USA. *Geoderma,* 209-210:153-160. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.009.

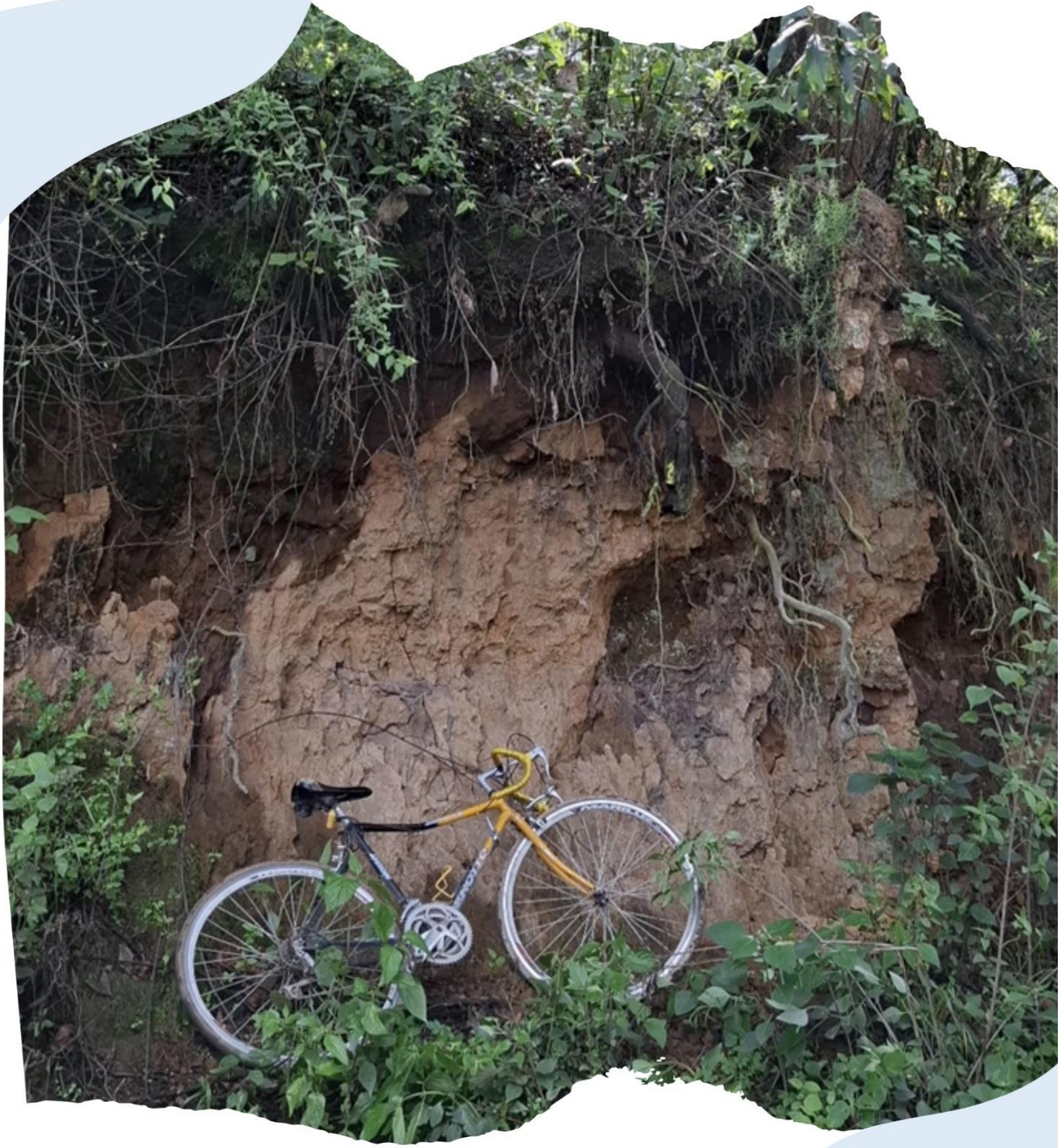
Carbajal Tradacete, F. J., Sánchez de Llanos, J. Á., González Burdiel, J. L., del Río Benito, Ó., Gonzalvo Navarro, J., García Moral, F. J., & Gutiérrez Iglesias, D. (2020). Hidrología del río Pánuco. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Del Ángel González, M. & Domínguez Mora, R. (2015). Estimación de avenidas de diseño en la cuenca baja del Río Pánuco: método de regionalización. Geos, 35(2). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. https://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos95-2/PÁNUCO.pdf

López-García, A.D., Ortega-Escobar, H.M., Ramírez-Ayala, C., Sánchez-Bernal, E.I., Can-Chulim, A., Gómez-Meléndez, D.J. & Vázquez-Alvarado, R.E. (2016). Caracterización fisicoquímica del agua residual urbano-industrial y su importancia en la agricultura. Tecnología y Ciencias del Agua, 7(6):139-157.

Pérez-Díaz, J.P., Ortega-Escobar, H.M., Ramírez-Ayala, C., Flores-Magdaleno, H., Sánchez-Bernal, E.I., Can-Chulim, Á. & Mancilla-Villa, O.R. (2019). Evaluación de la calidad del agua residual para el riego agrícola en Valle del Mezquital, Hidalgo. *Acta Universitaria*, 29(1): 1–11. https://doi.org/10.15174/au.2019.2117

Richards, L.A. (1973). Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual No. 60. Editorial LIMUSA, México.



Parque Ecoturístico Chalma Tetlalcolulco,
Amecameca, Estado de México



El Suelo: Pasado, Presente y Futuro de la Vida

ISBN: 978-607-26878-1-3