

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

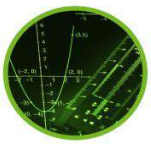
15-16 octubre de 2026

MEMORIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

Áreas Temáticas



Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible



Economía Agrícola, Desarrollo Territorial, Tecnología e Innovación Social



Ciencias Biológicas y Agronómicas



Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global



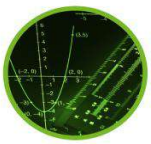
Desarrollo rural, agroecología y cambio climático

MEMORIA DE LA MESA 3

CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGRONÓMICAS

TOMO II

Áreas Temáticas



Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible



Economía Agrícola, Desarrollo Territorial, Tecnología e Innovación Social



Ciencias Biológicas y Agronómicas



Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global



Desarrollo rural, agroecología y cambio climático

TEMÁTICAS

4. **FITOPATOLOGÍA Y SANIDAD VEGETAL**
5. **RECURSOS FITOGENÉTICOS Y DIVERSIDAD GENÉTICA**
6. **BIOTECNOLOGÍA, NANOTECNOLOGÍA Y MICROBIOLOGÍA APLICADA**

El contenido de los trabajos aquí publicados es responsabilidad absoluta de los autores y coautores

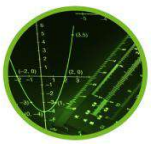
Compiladoras y Editoras

Rosa María García Núñez

Graciela Huerta Miranda

Amelia Rendón García

Áreas Temáticas



Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible



Economía Agrícola, Desarrollo Territorial, Tecnología e Innovación Social



Ciencias Biológicas y Agronómicas



Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global



Desarrollo rural, agroecología y cambio climático

Contenido

TEMÁTICA 4. FITOPATOLOGÍA Y SANIDAD VEGETAL (CONTROL BIOLÓGICO DE PLAGAS Y ENFERMEDADES)..... 10

Análisis exploratorio de la expresión diferencial presentada en 2 materiales genéticos contrastantes de maíz infectados por *Ustilago maydis* en dos etapas fenológicas

Fátima Adriana Hernández Cruz; J. Jesús García Zavala; Obdulia Lourdes Segura León; Martha Hernández Ródríguez..... 11|

Control alternativo de *Trichoderma longibrachiatum* en el cultivo de champiñon

Santiago-Elena, Eduardo; Martínez-Cruz, Julieta; Moreno-Guerrero, Disraeli Eron; Hernández-Cruz, Sergio..... 30

Efecto de *Trichoderma* spp. en precosecha y del agua activada por plasma en el manejo poscosecha de *Botrytis cinerea* en fresa

Juan Pablo Zavala Mendoza, Nadia Landero Valenzuela, José Antonio Flores Gonzalez, Gustavo Soria Argüello 41

Eficacia de aceites esenciales para el control de *Colletotrichum gloeosporioides* y la reducción de antracnosis postcosecha en mango

Petra Andrade-Hoyos; Aarón Mendieta-Moctezuma; Selma Ríos-Meléndez; Eduardo Molina-Gayosso..... 58

Eficacia de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio para el manejo de *Tillandsia* spp. en cítricos (*Citrus* spp.) en Perú

Agustina Valverde Rodríguez, Fiorela Villaflor Garay, Dalila Illatopa Espinoza; Miltao Edelio Campos Albornoz..... 67

Evaluación de alternativas para el control químico y biológico de enfermedades en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) en dos variedades de interés comercial en Colima, México

Nayeli Sarahí Quiñones Islas, Rubén Ortega Arreola, Raquel Roque Ruvalcaba, Juan Fabricio Lazcano Escobar..... 82

Evaluación de incidencia y severidad de roya (*Hemileia vastatrix)* en tres variedades de café (*Coffea arabica*) establecidas en el Sitio Experimental Teocelo, Veracruz

Karen Yoali Hernández-Gutiérrez, Edgar Couttolenc-Brenis 90

Evaluación de la actividad antifúngica del extracto etanólico de *Parthenium hysterophorus* L. contra *Fusarium oxysporum*

Jiménez García Lizbeth, Vicente Flores Macario, Cenobio Galindo Antonio de Jesús, Hernández Soto Iridiam 107

Evaluación de productos comerciales y alternativos contra el tizon tardio (*Phytophthora infestans*) en el cultivo de jitomate

Santiago-Elena, Eduardo; Martínez-Cruz, Julieta; Zamora-Macorra, Erika Janet; Elizalde-Gaytan, Karla G. 120

Evaluación del efecto de aceites esenciales de especies aromáticas sobre gusano cogollero (Spodoptera frugiperda)

Edgar López López, Gustavo Adolfo Anaya Montiel, Edgar Pascual Bustos Vargas, Miguel Ángel Serrato Cruz 134

Evaluación del potencial antifúngico de extractos de *Magnolia mexicana* DC. contra cepas de *Colletotrichum* spp. y *Penicillium* spp

Jessica Miriam Medrano Hernández, Néstor Emanuel Hernández Vidal, Norma Marina Alarcón Rodríguez, Diana Guerra Ramírez 145

Incidencia y progresión del manchado sectorial en *Citrus latifolia* y *Citrus sinensis* bajo condiciones de invernadero en Quintana Roo, México

César Antonio Casasola-Elizondo y José Ángel García-Sandoval 162

Influencia del inicio del control químico sobre la fluctuación poblacional de *Anthonomus eugenii* en chile Miahuateco, Santiago Miahuatlán, Puebla

Diana Fernanda Espinoza Castillo; Agustín Aragón García; Gabriel Antonio Lugo García; Betzabeth Cecilia Pérez Torres 178

Productores de sideróforos como S*treptomyces* biocontrol de patógenos de *F*ragaria *x ananassa*

Vidal-Melchor Josué, Cortés-Martínez R, Valdez-Alarcón J.J., Domínguez-González K.G. 179

Streptomyces spp. como modelo de biocontrol de *curvularia lunata*; una amenaza para los cultivos de México

Aline Michelle Meza-Salazar, David Guzmán-Hernández, Raúl Cortés-Martínez, Karla Gabriela Domínguez-González 188

TEMÁTICA 5. RECURSOS FITOGENÉTICOS Y DIVERSIDAD GENÉTICA 195

Calidad comercial y composicional de maíces nativos de Chiapas

María Gricelda Vázquez-Carrillo, Leticia García-Cruz, Jesús Martínez-Sánchez 196

Calidad, cantidad o compuestos bioactivos: estrategias reproductivas contrastantes en semillas de cuatro cactáceas mexicanas

José Valero-Galván, Yanelí Aurora Reyes-Ávila, Raquel González-Fernández, Miroslava Quiñonez-Martínez 212

Capacidad de fijar nitrógeno en cuatro variedades de maíz nativas de Puebla

Alejandro Celso Vallejo; Víctor A; González Hernández; Alejandro Alarcón; Oscar J. Ayala Garay 226

Composición proximal y respuesta germinativa de *Phytolacca icosandra* L., especie silvestre con valor nutricional potencial

Pablo Torres-Gutiérrez, José Antonio López-Sandoval, Aurelio Nieto-Trujillo, Santa Lucía Quintero-Bastida 233

Contenido mineral de semillas de frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) cultivados en la región Norte del estado de Guerrero, México

Oscar Martín Antúnez-Ocampo, Maria del Rosario Jacobo-Salcedo, Erika Nava-Reyna, José Luis Solís-Bonilla 248

Contenido mineral de semillas de frijol cultivados en la región Norte del estado de Guerrero, México

Oscar Martín Antúnez-Ocampo, Maria del Rosario Jacobo-Salcedo, Erika Nava-Reyna, José Luis Solís-Bonilla 258

Desarrollo del grano de polen y pared de la antera de *Tigridia pavonia* (L.F.) D.C.

Aída Carrillo Ocampo, Hilda Araceli Zavaleta Mancera, E. Mark Engleman† 271

Diversidad genética de chía (*Salvia hispanica* L.) de accesiones silvestres y cultivadas por medio de marcadores silicoDArT

Dalila Mérida-Hernández, Alma Aurelia Ramos-García, Sabina Irene Lara-Cabrera, Martha Hernández-Rodríguez 290

Diversidad genética de una colección núcleo de canela (*Cinnamomum verum* J. Presl*)* con marcadores SilicoDArT

Iseli Sánchez Álvarez, Martha Hernández Rodríguez, José Jesús García Zavala, Olga Santiago Trinidad 301

Evaluación de atributos morfológicos y de calidad del fruto en selecciones de aguacate 'Hass' (*Persea americana* Mill.) de huertos comerciales de Michoacán, México

Nelly Guadalupe Esquivel Miguel, Pedro Antonio García Saucedo, Víctor Manuel Coria Ávalos, Alejandro Facundo Barrientos Priego 315

Evaluación para su uso agrícola y alimenticio de germoplasma de dos especies de *Jaltomata* del centro de México

Ignacio Darío Flores-Sánchez y Manuel Sandoval-Villa 328

Morfología de plántulas de *Capsicum pubescens* procedentes del estado de Michoacán, México

Carlos Cisneros-Ponce, Ana Karen Escalera-Ordaz, Héctor Guillén-Andrade 349

Recolección y Caracterización de Germoplasma de Algodón (*Gossypium* sp.) del Estado de Michoacán

Martha Elena Pedraza Santos, Claudia Pérez Mendoza, Ma. del Rosario Tovar Gómez, Héctor Acuña Acuña 365

Relación entre la emisión de radícula y el porcentaje de plántulas normales en trigo en una prueba de germinación estándar

Paola Abigail Carmona Huesca. Natanael Magaña Lira. Patricia Landa Salgado 382

TEMÁTICA 6. BIOTECNOLOGÍA, NANOTECNOLOGÍA Y MICROBIOLOGÍA APLICADA 395

Caracterización fenotípica de hongos filamentosos de la colección *R* de la micoteca del Centro Universitario UTEG provenientes de suelo agavero fragmentado

Castillo Esparza Dana Aocela, Ramírez Martínez Izchel, María de los Ángeles Olea Rodríguez, Alemán Duarte Mario Iván, Edgar Balcázar López 396

Cinética de fermentación de *Kluyveromyces marxianus* en lactosuero para la producción de bioaromas mediante precursores

Miguel Ángel Hernández Cruz, Carlos Alberto Gómez Aldapa, Ariadna Bárbara Lara Gómez[2], Arturo Cadena Ramírez 410

Colonización micorrícica arbuscular asociada a raíces de *Crotalaria pallida* en suelos contaminados con petróleo crudo

Ana Guadalupe Ramírez-May, María del Carmen Rivera-Cruz, Antonio Trujillo-Narcía, José Alberto Orocio-Carrillo..... 424

Dinámica temporal y progresión ontogénica crítica durante el desarrollo *in vitro* de *Laelia anceps*

Buendía-Espinoza Julio César, Martínez-Ochoa Elisa del Carmen, Mendoza-López Areli Magali, Martínez-Mendoza Yojari Yaretzy..... 435

Efecto de la dosis de silicio en el cultivo *in vitro* de aguacate 'Duke7'

Alma Delia Abarca Cervantes, Fernando Carlos Gómez Merino, Libia Iris Trejo Téllez, Gregorio Arellano Ostoa..... 456

Metagenómica de la rizósfera identifica comunidades bacterianas asociadas con la productividad de suelos agrícolas en maíz (*Zea mays* L.)

Sebastián Cano-Serrano, José Juan Cano-Serrano, Gustavo Santoyo, Ma. del Carmen Orozco-Mosqueda..... 468

Microbiota apícola: aportes de los estudios *in silico* a la agronomía sostenible

Dailen Guanche Gallardo..... 478

Nanopartículas de óxido de zinc en la colorimetría de fresa

Disraeli Eron Moreno-Guerrero, Mario Pérez-Grajales, Eduardo Santiago-Elena, Francisco Farias-Oregel..... 491

Nanopartículas de plata en el crecimiento de fresa

Disraeli Eron Moreno-Guerrero, Mario Pérez-Grajales, Catalino Jorge López-Collado, Arely Flores-Núñez..... 500

Síntesis, caracterización y aplicación de nanomateriales a partir de espirulina como promotor de la germinación y crecimiento en cereales de interés económico del estado de Jalisco

Juan Pablo Viramontes Márquez, Gregorio Guadalupe Carbajal Arizaga, Nutan Prasad Rout..... 511

TEMÁTICA 4. FITOPATOLOGÍA Y SANIDAD VEGETAL (CONTROL BIOLÓGICO DE PLAGAS Y ENFERMEDADES)

Análisis exploratorio de la expresión diferencial presentada en 2 materiales genéticos contrastantes de maíz infectados por *Ustilago maydis* en dos etapas fenológicas

Fátima Adriana Hernández Cruz[1]; J. Jesús García Zavala[2]; Obdulia Lourdes Segura León[3]; Martha Hernández Ródríguez[4]

Resumen

El estudio de la interacción entre el maíz (*Zea mays*) y el huitlacoche (*Ustilago maydis*) es clave tanto para el manejo fitosanitario como para la producción dirigida del hongo. Para entender la arquitectura molecular de este patosistema, se evaluó la expresión génica diferencial global del hospedante en dos etapas fenológicas (plántula y elote), comparando una variedad nativa susceptible de Ayapango, Estado de México, con el híbrido comercial resistente A7573. Mediante un análisis transcriptómico y de enriquecimiento funcional (GO: BP), se observó que la variedad nativa susceptible activó una respuesta inmune robusta en plántula, pero con subexpresión de genes de respuesta a estrés múltiple, sugiriendo daño colateral. En etapa de elote, su respuesta fue muy débil, reflejando una desorganización total. Por su parte, el híbrido resistente A7573 reforzó la pared celular y activó la respuesta a proteínas mal plegadas (UPR) como mecanismo de defensa temprana en plántula. En la etapa de elote, mostró una respuesta inmune sistémica, coordinada y con represión específica de la fotosíntesis, sin presentar estrés colateral. Los resultados mostraron que la susceptibilidad no se debió a una falta de reconocimiento o respuesta, sino a una activación desregulada y caótica. En cambio, la resistencia del híbrido A7573 observada fue un proceso activo, coordinado y eficiente que ajustó su estrategia según la etapa de desarrollo. Estos hallazgos aportan información sobre las bases moleculares para entender la resistencia cuantitativa a *U. maydis* en maíz, relevantes en el desarrollo de variedades resistentes o en la producción controlada de huitlacoche.

Palabras clave: Resistencia cuantitativa a enfermedades (QDR); Análisis de componentes principales (PCA); Análisis de expresión diferencial; maíz (*Zea mays*); huitlacoche (*Ustilago maydis*)

[1] Colegio de Posgraduados, PREGEP-Genética; Carretera México-Texcoco Km. 36.5, C.P. 56264, Montecillo, Municipio de Texcoco, Estado de México; hernandez.fatima@colpos.mx
[2] Colegio de Posgraduados, PREGEP-Genética; Carretera México-Texcoco Km. 36.5, C.P. 56264, Montecillo, Municipio de Texcoco, Estado de México; zavala@colpos.mx
[3] Colegio de Posgraduados, Fitosanidad-Entomología; Carretera México-Texcoco Km. 36.5, C.P. 56264, Montecillo, Municipio de Texcoco, Estado de México; sleon@colpos.mx
[4] Colegio de Posgraduados, PREGEP-Genética; Carretera México-Texcoco Km. 36.5, C.P. 56264, Montecillo, Municipio de Texcoco, Estado de México; hernandez.martha@colpos.mx

Abstract

The study of the interaction between maize (*Zea mays*) and corn smut (*Ustilago maydis*) is key for both phytosanitary management and targeted fungus production. To understand the molecular architecture of this pathosystem, global differential gene expression of the host was evaluated at two phenological stages (seedling and ear), comparing a susceptible native variety from Ayapango, State of Mexico, with the resistant commercial hybrid A7573. Using transcriptomic and functional enrichment analyses (GO: BP), it was observed that the susceptible native variety activated a robust immune response at the seedling stage, but exhibited underexpression of multiple stress response genes, suggesting collateral damage. At the ear stage, its response was extremely weak, reflecting overall disorganization. Conversely, the resistant hybrid A7573 reinforced the cell wall and activated the unfolded protein response (UPR) as an early defense mechanism at the seedling stage. At the ear stage, it showed a systemic, coordinated immune response with specific repression of photosynthesis, without presenting collateral stress. The results demonstrated that susceptibility was not due to a lack of recognition or response, but rather to dysregulated and chaotic activation. In contrast, the observed resistance of hybrid A7573 was an active, coordinated, and efficient process that tailored its strategy according to the developmental stage. These findings provide insight into the molecular basis for understanding quantitative resistance to *U. maydis* in maize, relevant for developing resistant varieties or optimizing controlled corn smut production.

Keywords: Quantitative disease resistance (QDR); Principal component analysis (PCA); Differential expression analysis; Maize (*Zea mays*); Corn smut (*Ustilago maydis*)

Introducción

La comprensión de la interacción maíz - huitlacoche constituye un tema relevante tanto para el manejo fitosanitario como para la producción dirigida de este hongo biotrófico. Bajo esta premisa, el estudio de los mecanismos de defensa del hospedante es un paso fundamental para descifrar la arquitectura molecular de dicho patosistema. El conocimiento de estos componentes reguladores clave permitirá orientar futuras líneas de investigación en mejoramiento genético vegetal, proveyendo criterios precisos para guiar el desarrollo de genotipos con perfiles predecibles de resistencia cuantitativa o susceptibilidad controlada, de acuerdo con los objetivos de producción establecidos.

Diversos autores han adoptado enfoques distintos para interpretar los mecanismos genéticos responsables que subyacen en la respuesta de las plantas frente a enfermedades. En la

actualidad, la resistencia cuantitativa a enfermedades (QDR, Quantitative Disease Resistance) ha cobrado gran relevancia en el campo de la interacción planta-patógeno. Este tipo de defensa se asocia directamente con la denominada resistencia horizontal, la cual está mediada por múltiples genes localizados en regiones genómicas específicas conocidas como loci de caracteres cuantitativos (QTL), donde cada uno de estos genes realiza una contribución parcial al fenotipo final a través de un efecto aditivo. Dicha acumulación de efectos puede extrapolarse mediante la combinación estratégica de múltiples QTL, permitiendo generar niveles de resistencia elevados y estables que emulan la efectividad de la resistencia vertical (Burbano-Figueroa, 2020). Durante la infección, cuando existe reconocimiento del hospedante hacia el patógeno, la planta activa una respuesta defensiva que implica un conjunto de interacciones inmunitarias. Estas interacciones surgen entre los factores de virulencia del patógeno y los mecanismos inmunitarios del hospedante (Kumar *et al.*, 2011). Por lo que, para establecer la compatibilidad, los patógenos biotróficos, como *Ustilago maydis*, necesitan superar los mecanismos de defensa basales de las plantas desencadenados por los Patrones Moleculares Asociados a Patógenos (PAMP) (Brefort *et al.*, 2009).

Bajo este contexto, la identificación de los objetivos de los efectores de patógenos puede ayudar a explicar las diversas bases genéticas de la QDR, estos mecanismos están codificados por genes con funciones diversas, por ejemplo: caracteres morfológicos, procesos fisiológicos y fenológicos, reforzamiento de la pared celular, detoxificación, transducción de señales de defensa y genes R alterados o débiles, entre otros (Burbano-Figueroa, 2020). Asimismo, en su investigación Delplace *et al.* (2025) demostraron que la QDR es un proceso complejo, donde la resistencia no se debe a uno o dos genes, sino a una respuesta transcriptómica finamente organizada que varía entre los genotipos, lo cual concuerda con lo descrito por Kliebenstein (2014).

A nivel molecular, este fenómeno puede ser abordado mediante tecnologías ómicas. La integración actual de datos genómicos, transcriptómicos y metabolómicos está revolucionando la comprensión de la inmunidad vegetal. Este enfoque holístico permite identificar genes clave de resistencia, patrones de reprogramación transcripcional, modificaciones post-traduccionales, cambios metabólicos y dinámicas de influencia microbiana que, en conjunto, definen la arquitectura funcional de la inmunidad y la resistencia en el hospedante (Rajamuthu *et al.*, 2025). Asimismo, estas investigaciones exhaustivas complementan y dan rigor molecular a las evaluaciones fenotípicas tradicionales, así como a los análisis genéticos clásicos y proteómicos independientes.

Dentro de las ciencias Ómicas, particularmente con la transcriptómica, una técnica enfocada en la secuenciación de ARN (RNA-seq) a partir de la recolección de todos los ARN transcritos de un tejido o célula específicos en una etapa particular de desarrollo o estado funcional, ha sido posible identificar numerosos transcritos enriquecidos en vías relacionadas con la respuesta inmune de las plantas, incluyendo la señalización de fitohormonas y la biosíntesis de metabolitos importantes para la resistencia, los cuales se han encontrado expresados diferencialmente (Yin *et al.*, 2024). Esto ha ayudado a comprender cómo ocurre la respuesta del hospedante al patógeno en diferentes etapas y tejidos. Con base en todo lo anterior, el objetivo en esta investigación fue evaluar la expresión génica diferencial a nivel global de dos materiales genéticos contrastantes durante la interacción U. maydis - Z. mays en dos momentos críticos de desarrollo de la planta, con el fin de determinar los procesos biológicos clave que rigen la respuesta celular de la planta en estos materiales.

Materiales y métodos

El material susceptible que se utilizó fue Ay-21 Luis Flores (Ay-21 LF) variedad nativa de Ayapango, Estado de México, mientras que el genotipo resistente fue el híbrido A7573 de Asgrow (A7573). La selección de estos materiales fue con base en los resultados observados en evaluaciones realizadas previamente. En el Cuadro 1 se muestran las clasificaciones obtenidas para ambos genotipos.

Cuadro 1. Clasificación de genotipos analizados

Etapa	Ay-21 LF	A7573
plántula	Altamente susceptible	Moderadamente Resistente
elote	Susceptible	Moderadamente Resistente

La metodología de siembra e inoculación se modificó según el tejido a evaluar con el fin de garantizar condiciones específicas para cada etapa de evaluación. Para el tejido en plántulas, la siembra se realizó el 2 de junio de 2024 en vasos de unicel de 1 L, utilizando suelo previamente esterilizado para evitar interferencias microbiológicas. Se aplicó una fertilización inicial de 160N-80P-00K en una sola dosis. Se sembraron cuatro semillas por unidad experimental, realizándose posteriormente un aclareo a tres plántulas. El inóculo se produjo en laboratorio a partir de una cepa nativa, siguiendo la metodología descrita por Salazar-Torres *et al.* (2021). Este hongo fitopatógeno biotrófico puede cultivarse en condiciones axénicas, lo que permite obtener suspensiones estandarizadas para ensayos de infección controlada (Redkar & Doehlemann, 2016). La inoculación se realizó en la etapa V2 (segunda hoja verdadera), cuando los tejidos presentaban alta actividad meristemática y mayor susceptibilidad a la colonización del patógeno, que correspondió a los 15 días después

de la siembra (dds). Para la inoculación se aplicaron 500 µL de la suspensión de esporidias a una concentración de $20x10^6$ mL^{-1}, mediante inyección con jeringa estéril en el tallo, aproximadamente a 2 cm por debajo de la hoja cotiledonal.

En el caso del tejido de elote, la siembra se realizó de forma manual el 22 de mayo del 2024 con una densidad de 83,333 plantas ha^{-1}. La preparación del terreno consistió en barbecho, paso de rastra y surcado. La fertilización se basó en la dosis 160N–80P–00K. Para el control de malezas, se aplicó Gesaprim Calibre 90 GDA® (1 kg ha^{-1}) combinado con Primagran® Gold (3 L ha^{-1}) a los 7 días después de la siembra (dds). Posteriormente a los 60 dds se realizó una segunda aplicación mediante una mezcla de Gesaprim Calibre 90 GDA® y Gramoxone®. El aporte hídrico se cubrió mediante riegos semanales suplementarios, alternados con condiciones de temporal durante el periodo de precipitación pluvial. El inóculo de *U. maydis* se produjo bajo las mismas condiciones previamente señaladas. En el caso de la inoculación en elote esta se realizó durante la etapa de emisión de estigmas, cuando estos presentaban una longitud aproximada de 5 cm, asegurando que la inoculación fuera previa a la polinización, conforme a lo descrito por Villanueva-Verduzco *et al.* (2007). Se aplicaron en total 3 mL de suspensión de esporidias a una concentración de $20x10^6$ mL^{-1} por cada inflorescencia femenina, en tres sitios cada uno con 1 mL a lo largo del elote en formación, con una jeringa repetidora equipada con aguja de calibre 3/8. En cada unidad experimental se incluyó un surco testigo sin inocular para diferenciar la enfermedad inducida de la incidencia natural del patógeno.

Los genotipos se evaluaron mediante un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones para cada tipo de tejido (plántula y elote) en dos condiciones: inoculado y testigo o no inoculado, considerando ambos germoplasmas contrastantes. El tejido para el análisis transcriptómico se colectó a los 10 días posteriores a la inoculación (dpi) en todos los tratamientos.

Para la colecta de tejido en plántulas se tomó tejido de la segunda hoja verdadera de ocho plántulas por repetición utilizando un sacabocados de 0.8 cm de diámetro. Las muestras se colocaron en tubos tipo Eppendorf de 2 mL que contenían 1 mL de RNAlater®, asegurando la cobertura completa del tejido con el reactivo, y se conservaron de acuerdo con las indicaciones del producto. Se colectó tejido a partir de seis elotes del tratamiento inoculado y seis del testigo. Para ello, se marcó el área central en las hojas que recubren el elote (totomoxtle) y se limpió la zona con agua destilada estéril. Con un bisturí esterilizado, se cortaron las hojas para levantarlas con pinzas estériles; posteriormente, utilizando un sacabocados de 0.8 cm de diámetro, se extrajo el tejido correspondiente a los granos en formación. Las muestras se colocaron en tubos tipo Eppendorf de 2 mL con 1 mL de

RNAlater®, asegurando la cobertura completa del tejido, y se conservaron a 4 °C. De acuerdo con las indicaciones del producto. Las 24 muestras (2 genotipos × 2 tejidos × 2 condiciones experimentales × 3 repeticiones biológicas) conservadas en RNAlater® se enviaron al laboratorio Haplox en Hong Kong. La extracción de ARN y la preparación de las librerías se realizaron conforme a los protocolos internos de dicho laboratorio. Finalmente, la secuenciación se llevó a cabo en la plataforma Illumina NovaSeq.

El análisis bioinformático incluyó una serie de pasos que se describen a continuación. El control de calidad inicial de las lecturas crudas, el cual se realizó en el entorno Linux utilizando las herramientas FastQC (v0.12.1) (Andrews, 2010) y MultiQC (v1.18) (Ewels *et al.*, 2016). Mediante FastQC se evaluaron los parámetros individuales por muestra. Posteriormente, los reportes individuales se compilaron con MultiQC para permitir un análisis comparativo global de la calidad de todas las librerías. Aquellas lecturas que no cumplieron con los umbrales óptimos de calidad (Phred score Q < 30) y los remanentes de adaptadores indexados fueron removidos mediante un proceso de trimado y filtrado automatizado utilizando la herramienta fastp (v1.0.1) (Chen *et al.*, 2018). Las lecturas limpias resultantes de este proceso se exportaron y cargaron en la plataforma web Galaxy para continuar con las etapas subsecuentes del análisis bioinformático.

Una vez importadas las lecturas limpias en la plataforma Galaxy, se ejecutó un segundo análisis de control de calidad utilizando las herramientas FastQC (v0.12.1) y MultiQC (v1.11). Esta evaluación complementaria se realizó con el propósito de verificar la efectividad del proceso de trimado, garantizando la remoción exitosa de los adaptadores y de las bases de baja calidad, así como asegurar que el conjunto de datos definitivo cumpliera con los estándares óptimos requeridos para el mapeo genómico. El mapeo/alineamiento de las lecturas limpias se realizó contra el genoma de referencia de maíz (*Zea mays*, versión B73 RefGen_v4) (*Gramene*, 2025) . Para ello, se utilizó el mapeador de empalmes (splice-aware aligner) HISAT2 (v2.2.1) (Kim *et al.*, 2019), dentro de la plataforma Galaxy. El flujo de procesamiento consistió inicialmente en la construcción del índice del genoma de referencia mediante el módulo hisat2-build con los hilos disponibles, seguido de esto, se procedió con el mapeo/alineamiento de las lecturas pareadas de cada librería. Los resultados de este proceso se operaron con las herramientas de samtools, como sort para ordenar las lecturas con base a las coordenadas genómicas y view para convertir los archivos SAM a BAM (Binary Alignment Map). Para evaluar el desempeño y la robustez del mapeo generado por HISAT2, se obtuvieron estadísticas analíticas detalladas de los archivos BAM resultantes mediante el uso de samtools stats (v2.0.6). Este control reportó métricas importantes del alineamiento referentes al control de calidad biológica y técnica, incluyendo: porcentaje total de lecturas mapeadas; proporción de lecturas mapeadas en pares correctos; tasa de

duplicación de secuencias, profundidad y cobertura por base a lo largo del genoma de referencia y finalmente distribución de la calidad del mapeo. Estos indicadores se analizaron rigurosamente para verificar la integridad de cada librería mapeada antes de proceder con la etapa de cuantificación de la expresión génica. Posteriormente, el conteo y asignación de las lecturas alineadas a las características génicas anotadas del genoma se realizó con la herramienta HTSeq-count (v2.0.5), para cada tratamiento y repetición. El proceso generó una matriz de conteos crudos por gen (número de lecturas mapeadas exactamente a cada locus), complementada con un reporte detallado de estadísticas de asignación que indicó la proporción de lecturas no asignadas debido a ambigüedades, características múltiples o ausencia de características. Finalmente, el total de las lecturas asignadas por muestra y repetición se calculó y validó.

Para realizar el análisis de expresión diferencial se comenzó con un Análisis de Componentes Principales (PCA) para lo cual los conteos crudos obtenidos de HTSeq-count se exportaron al entorno de RStudio. A continuación, se construyó una matriz que comprendió las 24 muestras experimentales (2 genotipos × 2 tejidos × 2 condiciones experimentales × 3 repeticiones biológicas). A partir de esta matriz de diseño y de los conteos generados por HTSeq-count se generó un objeto de clase DESeqDataSet mediante la paquetería DESeq2 (v1.50.2). Antes del análisis exploratorio, se realizó un filtrado bioinformático para remover transcritos con baja expresión, conservando únicamente aquellos genes que presentaron un conteo promedio superior a 10 lecturas entre todas las muestras. Posteriormente, los datos se sometieron a una transformación de estabilización de la varianza (VST, Variance-Stabilizing Transformation), incorporando la información del diseño experimental. Con los datos transformados por VST, se ejecutó un Análisis de Componentes Principales (PCA) global. Se extrajeron las coordenadas de los dos primeros componentes (PC1 y PC2) y se determinó el porcentaje de varianza explicada por cada uno en función de la varianza transcriptómica total del set de datos. La visualización gráfica se realizó mediante el paquete ggplot2 (v4.0.3) empleando un gráfico de dispersión, donde cada punto representó una muestra biológica diferenciada por color según la etapa de desarrollo: plántula o elote; por forma de acuerdo con la condición experimental: testigo o inoculado y etiquetada explícitamente con el nombre del genotipo. A partir del agrupamiento global observado en el PCA, se definieron cuatro contrastes biológicos independientes (Cuadro 2) para dirigir los análisis subsecuentes.

Cuadro 2. Contrastes a comparar entre los tratamientos evaluados.

Genotipo	Tejido	Tratamientos a comparar
Ay-21 LF	plántula	Testigo vs Inoculado
A7573	plántula	Testigo vs Inoculado

Ay-21 LF	elote	Testigo vs Inoculado
A7573	elote	Testigo vs Inoculado

La normalización y el análisis de expresión diferencial se realizaron con el paquete DESeq2 (v1.50.2). La normalización se realizó mediante el método de proporciones de medianas implementado en la función DESeq(), que estima factores de tamaño, dispersión y ajusta un modelo lineal generalizado con distribución binomial negativa. Los genes diferencialmente expresados (DEGs) se identificaron utilizando el contraste inoculado vs testigo. Se consideraron estadísticamente significativos los genes con un valor de log2FoldChange absoluto ≥ 1 y un valor p ajustado (FDR, método de Benjamini-Hochberg) < 0.01. Para cada contraste, se generaron gráficos de volcano (volcano plots) mediante el paquete EnhancedVolcano (v1.28.2), donde se visualizó la relación entre log2FoldChange y el valor p ajustado, destacando los DEGs en colores contrastantes.

El enriquecimiento funcional de términos de Ontología Génica (GO) se realizó mediante el paquete gprofiler2 (v0.2.4) (Kolberg *et al.*, 2020). Para cada contraste, se utilizaron las listas de genes diferencialmente expresados (DEGs) separadas en genes sobreexpresados (log2FoldChange > 1) y subexpresados (log2FoldChange < -1). Se consultó la base de datos en línea de g:Profiler para el organismo *Zea mays* (zmays). Con base en la literatura y en el enfoque exploratorio de este trabajo, el análisis de enriquecimiento se centró solamente en la ontología de Procesos Biológicos (GO:BP), para lo cual se consideraron significativos los términos con valor p ajustado (método de Benjamini-Hochberg) < 0.05. Los resultados se visualizaron mediante diagramas de puntos (dotplots) generados con ggplot2 (versión 4.0.3). En estos gráficos, el eje X representó el GeneRatio, calculado como el número de genes DE en la categoría GO dividido por el número total de genes DE en el contraste analizado (expresado como proporción de 0 a 1). El tamaño de los puntos representó el Count (número absoluto de genes DE en el término GO), y el color indicó el nivel de significancia en escala -log10 (p-value ajustado), donde valores más altos (rojo intenso) correspondieron a una mayor significancia estadística. Los términos GO se ordenaron en el eje Y de mayor a menor significancia.

Resultados y discusión

El PCA global mostró que el primer componente principal (PC1, 84% de varianza) separó claramente las muestras por tejido: es decir, plántula vs elote, indicando que el periodo de desarrollo es el principal factor de variación transcripcional. El segundo componente (PC2, 6% de varianza) evidenció una separación entre muestras testigo e inoculadas, donde las plantas inoculadas mostraron un desplazamiento hacia valores positivos de PC2. En la etapa

de plántula, la respuesta al patógeno fue más evidente en el genotipo Ay-21 LF (S), cuyas muestras inoculadas se separaron notablemente de sus testigos, lo mismo se observó en la etapa de elote, sin embargo, en este caso la respuesta al patógeno fue más evidente en el genotipo A7573 (R), cuyas muestras inoculadas se separaron notablemente de sus testigos a lo largo de PC2. Estos hallazgos respaldan los resultados de los capítulos anteriores, describiendo que la respuesta a *Ustilago maydis* es dependiente de la etapa de desarrollo y del genotipo (Figura 1).

Al realizar el análisis de componentes principales para cada contraste se obtuvieron los porcentajes mostrados en el Cuadro 3. En la etapa de plántula para el genotipo Ay-21 LF, la suma de ambos componentes principales explicó el 76% de la varianza total, logrando una clara separación entre las condiciones comparadas. Por su parte, en el genotipo A7573 en la etapa de elote, el PC1 y 2 explicó el 80% de la varianza total. Estos porcentajes de variación evidencian una marcada respuesta transcriptómica ante el estímulo del patógeno en ambos genotipos y tejidos evaluados.

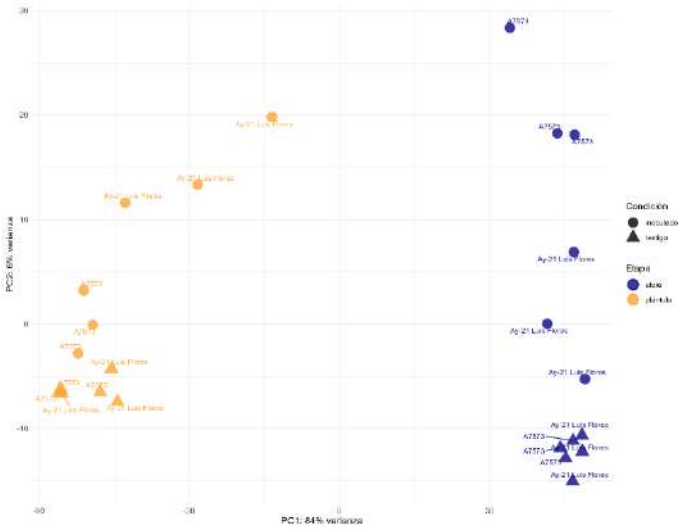


Figura 1 Análisis de componentes principales de las 24 muestras analizadas.

Cuadro 3. Componentes principales que explican el porcentaje de varianza dentro de cada contraste evaluado

Genotipo	Tejido	Tratamientos a comparar	PC1 (%)	PC2 (%)	Total (%)
Ay-21 LF	plántula	Testigo vs Inoculado	58	18	76
A7573	plántula	Testigo vs Inoculado	45	23	68

Ay-21 LF	elote	Testigo vs Inoculado	36	28	64
A7573	elote	Testigo vs Inoculado	65	15	80

Posteriormente al evaluar el perfil de expresión diferencial en el contraste de Ay-21 LF en etapa de plántula, se identificaron un total de 1,735 genes diferencialmente expresados (DEGs, *Differentially Expressed Genes*). Del conjunto global de transcritos con regulación significativa, 1,129 genes se encontraron sobreexpresados (regulados positivamente), mientras que 606 se detectaron subexpresados (regulados negativamente) en respuesta a la inoculación con *Ustilago maydis*. En el caso del contraste de A7573 en etapa de plántula, se identificaron un total de 537 genes diferencialmente expresados (DEGs, *Differentially Expressed Genes*). Del conjunto global de transcritos con regulación significativa, 261 genes se encontraron sobreexpresados (regulados positivamente), mientras que 276 se detectaron subexpresados (regulados negativamente) en respuesta a la inoculación con *Ustilago maydis*. Por otro lado, en el perfil de expresión diferencial en el contraste de Ay-21 LF en etapa de elote, se identificaron un total de 190 genes diferencialmente expresados (DEGs, *Differentially Expressed Genes*). Del conjunto global de transcritos con regulación significativa, 120 genes se encontraron sobreexpresados (regulados positivamente), mientras que 70 se detectaron subexpresados (regulados negativamente) en respuesta a la inoculación con *Ustilago maydis*. Finalmente, al evaluar el perfil de expresión diferencial en el contraste de A7573 en etapa de elote, se identificaron un total de 2620 genes diferencialmente expresados (DEGs, *Differentially Expressed Genes*). Del conjunto global de transcritos con regulación significativa, 1857 genes se encontraron sobreexpresados (regulados positivamente), mientras que 763 se detectaron subexpresados (regulados negativamente) en respuesta a la inoculación con *Ustilago maydis*.

El análisis de enriquecimiento funcional se centró exclusivamente en la ontología de Procesos Biológicos (GO:BP, Biological Process). Esta decisión se fundamentó en que la resistencia vegetal, particularmente aquella mediada por genes de resistencia (R), constituye un sistema complejo que requiere la activación coordinada de múltiples eventos moleculares, tales como el reconocimiento del patógeno, la transducción de señales y la respuesta hipersensible, entre otros, los cuales se encuentran catalogados bajo esta categoría ontológica (Amin & Zaman, 2025; Ng, 2025). Si bien las ontologías de Función Molecular (GO:MF, Molecular Function) y Componente Celular (GO:CC, Cellular Component) son complementarias y podrían aportar información adicional respecto a los mecanismos finos de la resistencia cuantitativa a enfermedades, su evaluación se ha reservado para investigaciones subsecuentes.

El enriquecimiento funcional de los DEGs en Ay-21 LF en plántula, mostró que de los 1129 genes sobreexpresados están anotados en 52 términos GO significativos entre los cuales destacan: Fosforilación de proteínas; Respuesta a estímulos bióticos; Respuesta a estímulos bióticos externos; Respuesta a otros organismos; Proceso biológico involucrado en la interacción entre especies; Fosforilación; Respuesta a estímulos externos y Respuesta de defensa entre otros (Figura 2A). Lo que nos muestra que el hospedante activó una respuesta inmune transcripcionalmente robusta, incluyendo el reconocimiento del patógeno, cascadas de señalización mediadas por fosforilación y la expresión de genes de defensa (Ng, 2025). Sin embargo, al revisar la contra parte en el genotipo Ay-21 LF en plántula, los 606 genes subexpresados se asocian en 27 términos GO significativos, entre los cuales destacan: Respuesta al calor; Plegamiento de proteínas; Respuesta a estímulos de temperatura; Respuesta a estímulos abióticos; Maduración de proteínas; Respuesta al estrés osmótico; Fotosíntesis; Replegamiento de proteínas y Respuesta celular al calor entre otros. Es decir, los genes down-regulados incluyen múltiples procesos de respuesta a estrés (térmico, osmótico, oxidativo y plegamiento de proteínas). La subexpresión de estos genes indica que la planta no puede activar estas respuestas de protección, lo que resulta en daño celular colateral (Figura 2B). Esto concuerda con lo reportado por Quilis *et al.* (2008) en donde el gen regulador AtNPR1 de *Arabidopsis* se expresa en arroz para conferir resistencia a hongos y bacterias, también reprime negativamente la expresión de genes de respuesta a estrés por sal y sequía (como rab21, salT y dip1), lo que aumenta la sensibilidad de las plantas a esas condiciones de estrés abiótico.

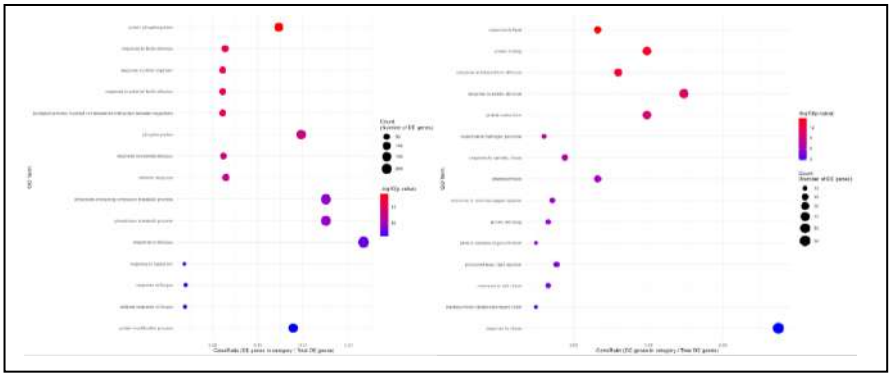


Figura 2. A) Enriquecimiento GO (BP) Ay-21 LF en plántula de los genes sobre expresados. B) Enriquecimiento GO (BP) Ay-21 LF en plántula de los genes subexpresados.

Los 261 genes diferencialmente sobreexpresados en A7573 en plántula se asociaron en 32 términos GO significativos, entre los cuales destacan: Biogénesis de la pared celular vegetal;

Organización o biogénesis de la pared celular vegetal; Biogénesis de la pared celular; Proceso biosintético de polisacáridos; Proceso biosintético de celulosa; Proceso metabólico de la celulosa y Biogénesis de la pared celular primaria vegetal, entre otros. La sobre expresión de estos genes muestra un aumento en la síntesis, organización y modificación de la pared celular, lo que da lugar al engrosamiento de la pared con celulosa y polisacáridos, dificultando la entrada del patógeno dentro del tejido de las hojas en las plántulas. Estos resultados concuerdan con lo descrito por Quiroz-Figueroa *et al.* (2023) en maíz, en donde la resistencia a *Fusarium verticillioides* se asoció con la activación de genes de biosíntesis y organización de la pared celular, así como con un aumento de células lignificadas en la zona de la hipodermis (Figura 3A). Sin embargo, los 276 genes diferencialmente subexpresados en A7573 en plántula se asociaron en 25 términos GO significativos, entre los cuales destacan: plegamiento de proteínas; respuesta al calor; maduración de proteínas; respuesta a estímulos de temperatura; respuesta a estímulos abióticos; replegamiento de proteínas; oligomerización de complejos proteicos y respuesta celular al calor, entre otros (Figura 3B). A diferencia de la respuesta de Ay-21 LF, estos términos suprimidos no indican un daño colateral como en el susceptible, sino la activación de mecanismos de defensa altamente conservados. El estrés por calor y la infección por patógenos confluyen en un mismo punto: la acumulación de proteínas mal plegadas. La presencia de términos GO asociados al plegamiento de proteínas y respuesta al calor sugiere una activación temprana de la Respuesta a Proteínas Mal Plegadas (UPR, por sus siglas en inglés). Esta vía, mediada por el splicing del mRNA del factor de transcripción bZIP60 por parte de la enzima IRE1, ha sido documentada en maíz durante la interacción con el patógeno *Ustilago maydis,* durante la cual se ha demostrado que el hongo requiere la UPR para secretar efectores que suprimen la defensa de la planta, mientras que la planta activa genes de defensa como *ZmbZIP* en respuesta a la infección y bajo condiciones de estrés por calor (Pinter *et al.*, 2019). La activación de UPR permite a la célula restaurar la homeostasis del retículo endoplásmico, secretar proteínas de defensa y evitar la muerte celular programada (Li *et al.*, 2020; Neill *et al.*, 2019). Con base en esto, la detección de estos procesos en el genotipo A7573 durante la

etapa de plántula podría reflejar una respuesta coordinada que limita el daño celular durante la infección, contribuyendo así al fenotipo de resistencia parcial observado previamente.

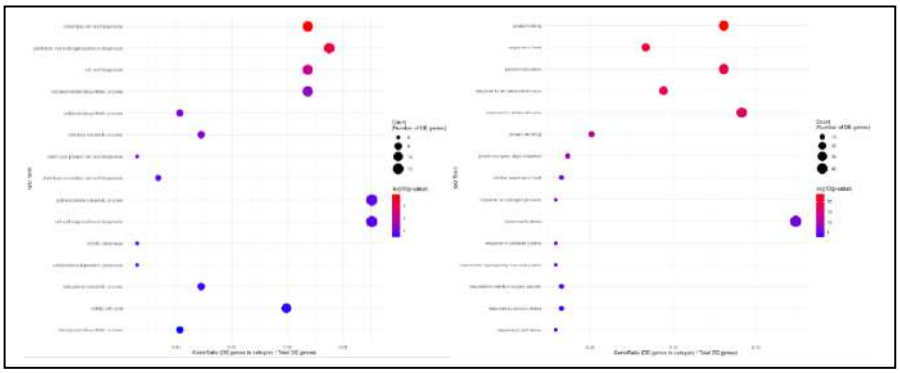


Figura 3. A) Enriquecimiento GO (BP) A7573 en plántula de los genes sobre expresados. B) Enriquecimiento GO (BP) A7573 en plántula de los genes subexpresados.

El enriquecimiento funcional de los DEGs en Ay-21 LF en elote, mostró que los 120 genes sobreexpresados están anotados en 7 términos GO significativos, los cuales son: respuesta a compuestos que contienen oxígeno; respuesta a hongos; respuesta a sustancias químicas; respuesta al estrés salino; respuesta a estímulos bióticos; respuesta al estrés osmótico; respuesta de defensa contra hongos (Figura 4). Mientras que de los 70 genes sub expresados no hubo ningún termino GO significativo. La ausencia de términos GO significativamente enriquecidos en los genes subexpresados del genotipo susceptible Ay-21 LF en etapa de elote refleja una respuesta transcripcional débil y desorganizada. Este hallazgo es biológicamente relevante: indica que, a diferencia del genotipo resistente, el genotipo susceptible no logra montar una respuesta de defensa estructurada. La ausencia de términos GO en los genes subexpresados y el bajo número de términos en los sobreexpresados son indicativos de una respuesta transcripcional débil y desorganizada. Una defensa vegetal efectiva requiere una dirección y coordinación de la expresión génica, un proceso que implica una compleja regulación a nivel transcripcional (Kliebenstein, 2014).

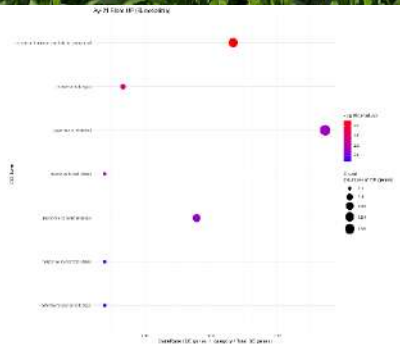


Figura 4. Enriquecimiento GO (BP) Ay-21 LF en elote de los genes sobre expresados.

En el caso de A7573 en elote, el enriquecimiento funcional mostró que los 1857 genes sobre expresados están anotados en 63 términos GO significativos, entre los cuales destacan: respuesta química; respuesta a un estímulo; respuesta a un estímulo biótico externo; respuesta a otro organismo; fosforilación de proteínas; respuesta a un estímulo biótico; regulación de la transcripción mediada por ADN; proceso biológico involucrado en la interacción entre especies; respuesta a un estímulo externo y respuesta de defensa, entre otros (Figura 5A).

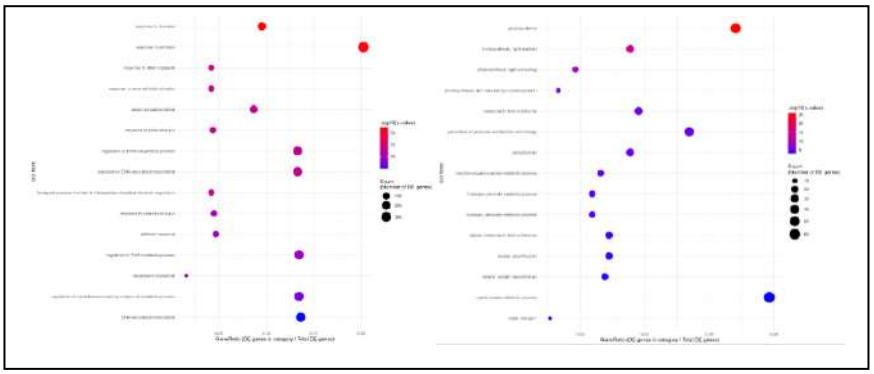
Finalmente, en el caso de A7573 en elote el enriquecimiento funcional mostró que los 763 genes subexpresados están anotados en 22 términos GO significativos, entre los cuales destacan: fotosíntesis; fotosíntesis, reacción lumínica; fotosíntesis, captación de luz; fotosíntesis, captación de luz en el fotosistema I; respuesta a sustancias tóxicas; generación de metabolitos precursores y energía; desintoxicación; proceso metabólico de especies reactivas de oxígeno y proceso catabólico del peróxido de hidrógeno, entre otros (Figura 5B).

El genotipo resistente A7573 en elote mostró una respuesta de defensa robusta (Figura 5), caracterizada por la activación de genes de defensa, señalización (quinasas) y regulación transcripcional, junto con la represión específica de genes asociados a fotosíntesis.

Notablemente, no se detectaron términos de estrés (calor, osmótico, plegamiento) en esta condición, lo que indica una respuesta limpia, organizada y probablemente efectiva para limitar al patógeno. En plántula, como se observó previamente, A7573 priorizó el refuerzo de la pared celular (síntesis de celulosa, biogénesis de pared) como mecanismo de defensa temprana, aunque con cierta evidencia de estrés térmico y de plegamiento. Mientras que, en elote, la defensa fue más especializada (señalización, respuesta a patógeno). Esto sugiere que

A7573 ajusta su estrategia de defensa según la etapa de desarrollo, siendo más efectiva en elote.

Figura 5. A) Enriquecimiento GO (BP) A7573 en elote de los genes sobreexpresados. B) Enriquecimiento GO (BP) A7573 en elote de los genes subexpresados.



El análisis transcriptómico realizado permitió comprender un poco más acerca de los mecanismos responsables de la respuesta fenotípica observada en campo. Nuestros resultados demuestran que la resistencia no es un proceso pasivo, sino el resultado de una respuesta transcripcional activa, coordinada y altamente regulada, cuyas características varían según la etapa de desarrollo y el genotipo. En el genotipo resistente A7573, la defensa es efectiva porque está finamente orquestada (Kliebenstein, 2014). En la etapa de plántula, la planta prioriza una barrera física, enriqueciendo procesos de biosíntesis y organización de la pared celular. En la etapa de elote, la estrategia cambia hacia una respuesta inmune sistémica, con activación de genes de defensa, señalización por quinasas y regulación transcripcional, junto con una represión limpia y específica de la fotosíntesis. Este perfil concuerda con estudios que demuestran que una defensa exitosa involucra genes de señalización, factores de transcripción como *WRKY*, metabolismo redox controlado, evidenciando una base poligénica y altamente regulada (Yin *et al.*, 2024). En *Arabidopsis*, por ejemplo, se encontró que los genes activados durante la QDR están involucrados en metabolismo primario/secundario, transporte y respuesta a defensa, mientras que los genes reprimidos están asociados a fotosíntesis y desarrollo, indicando un costo energético para la planta (Delplace *et al.*, 2025). En contraste, el genotipo susceptible Ay-21 LF muestra una respuesta transcripcional débil y desorganizada, caracterizada por una firma de estrés celular múltiple (térmico, osmótico, estrés de retículo endoplásmico). Aunque activa genes de defensa, lo hace de manera descoordinada, sin lograr establecer un programa de represión génica coherente, especialmente en la etapa de elote donde no se detectó ningún proceso

biológico significativo entre los genes subexpresados. Esta respuesta deficiente refleja una incapacidad para integrar y orquestar las distintas rutas de defensa, lo que resulta en daño colateral que, lejos de controlar la infección, probablemente favorece la colonización del patógeno.

Los hallazgos de este estudio se alinean con la visión actual de la inmunidad vegetal. La respuesta de defensa no es un interruptor de "todo o nada", sino un programa transcripcional complejo y altamente regulado que implica la activación coordinada de múltiples procesos y la supresión de otros (Delplace *et al.*, 2025; Loon *et al.*, 2006). La desregulación de este programa es una característica distintiva de la susceptibilidad. Nuestros resultados, al identificar los términos GO y los procesos biológicos que distinguen al genotipo resistente del susceptible, proporcionan información sobre la base molecular en esta interacción para entender la variación fenotípica observada en el campo desde el punto de vista de la Resistencia Cuantitativa a Enfermedades.

Conclusiones

Los perfiles de expresión génica identificados en este estudio revelan mecanismos transcriptómicos contrastantes que sustentan la divergencia entre los fenotipos de susceptibilidad y resistencia en el patosistema evaluado. En conjunto, las evidencias demuestran que la susceptibilidad observada en el genotipo Ay-21 LF no deriva de una ausencia en la respuesta transcripcional, sino de una marcada desregulación de la respuesta de defensa que conduce al desarrollo del hongo en el hospedante.
La ausencia de enriquecimiento funcional en el conjunto de genes subexpresados para el genotipo Ay-21 LF en etapa de elote, confirma que la respuesta de este material susceptible se encamina de manera prioritaria hacia la sobreexpresión de transcritos asociados a estrés generalizado (térmico, osmótico y oxidativo) disminuyendo la activación de rutas de defensa específicas contra el hongo, lo cual explica la severidad de la respuesta fenotípica observada en las evaluaciones previas.

Por el contrario, la resistencia exhibida por el híbrido A7573 en la etapa de elote se encuentra asociada a una respuesta molecular coordinada, altamente específica y caracterizada por una atenuación del estrés celular acompañada de una clara redirección de recursos energéticos; un ejemplo de esto fue la subexpresión significativa de genes asociados a la fotosíntesis.
Estos hallazgos aportan información sobre genes potenciales para profundizar en el estudio de la interacción maíz-*Ustilago maydis* y que posteriormente sean integrados en programas de mejoramiento enfocado en resistencia cuantitativa.

Literatura citada

Amin, A., & Zaman, W. (2025). Integrative Perspectives on Multi-Level Mechanisms in Plant-Pathogen Interactions: From Molecular Defense to Ecological Resilience. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, *94*(7), 1973–1996. https://doi.org/10.32604/phyton.2025.067885

Andrews, S. (2010). *FastQC: A quality control tool for high throughput sequence data* (Versión Version 0.12.1) [Software]. Babraham Bioinformatics, Babraham Institute. https://www.bioinformatics.babraham.ac.uk/projects/fastqc/

Brefort, T., Doehlemann, G., Mendoza-Mendoza, A., Reissmann, S., Djamei, A., & Kahmann, R. (2009). *Ustilago maydis* as a Pathogen. *Annual Review of Phytopathology*, *47*(1), 423–445. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080508-081923

Burbano-Figueroa, Ó. (2020). Resistencia de plantas a patógenos: Una revisión sobre los conceptos de resistencia vertical y horizontal. *Revista Argentina de Microbiología*, *52*(3), 245–255. https://doi.org/10.1016/j.ram.2020.04.006

Chen, S., Zhou, Y., Chen, Y., & Gu, J. (2018). fastp: An ultra-fast all-in-one FASTQ preprocessor. *Bioinformatics*, *34*(17), i884–i890. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty560

Delplace, F., Khafif, M., Stam, R., Barbacci, A., & Raffaele, S. (2025). Neutral transcriptome rewiring promotes quantitative disease resistance evolvability at the species level. *The Plant Cell*, *37*(6), koaf105. https://doi.org/10.1093/plcell/koaf105

Ewels, P., Magnusson, M., Lundin, S., & Käller, M. (2016). MultiQC: Summarize analysis results for multiple tools and samples in a single report. *Bioinformatics*, *32*(19), 3047–3048. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btw354

Gramene. (2025). https://www.gramene.org/release-notes-53

Kim, D., Paggi, J. M., Park, C., Bennett, C., & Salzberg, S. L. (2019). Graph-based genome alignment and genotyping with HISAT2 and HISAT-genotype. *Nature Biotechnology*, *37*(8), 907–915. https://doi.org/10.1038/s41587-019-0201-4

Kliebenstein, D. J. (2014). Orchestration of plant defense systems: Genes to populations. *Trends in Plant Science*, *19*(4), 250–255. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.01.003

Kolberg, L., Raudvere, U., Kuzmin, I., Vilo, J., & Peterson, H. (2020). *gprofiler2—An R package for gene list functional enrichment analysis and namespace conversion toolset g:Profiler*. F1000Research. https://doi.org/10.12688/f1000research.24956.2

Kumar, H., Kawai, T., & Akira, S. (2011). Pathogen recognition by the innate immune system. *International Reviews of Immunology*, *30*(1), 16–34. https://doi.org/10.3109/08830185.2010.529976

Li, Z., Tang, J., Srivastava, R., Bassham, D. C., & Howell, S. H. (2020). The Transcription Factor bZIP60 Links the Unfolded Protein Response to the Heat Stress Response in Maize[OPEN]. *The Plant Cell*, *32*(11), 3559–3575. https://doi.org/10.1105/tpc.20.00260

Loon, L. C. van, Rep, M., & Pieterse, C. M. J. (2006). Significance of Inducible Defense-related Proteins in Infected Plants. *Annual Review of Phytopathology*, *44*(Volume 44, 2006), 135–162. https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.44.070505.143425

Neill, E. M., Byrd, M. C. R., Billman, T., Brandizzi, F., & Stapleton, A. E. (2019). Plant growth regulators interact with elevated temperature to alter heat stress signaling via the Unfolded Protein Response in maize. *Scientific Reports*, *9*, 10392. https://doi.org/10.1038/s41598-019-46839-9

Ng, P. Q. (2025). Quantitive disease resistance (QDR): The alternative to "all-or-nothing" strategy in plant immunity. *The Plant Cell*, *37*, koaf132. https://doi.org/10.1093/plcell/koaf132

Pinter, N., Hach, C. A., Hampel, M., Rekhter, D., Zienkiewicz, K., Feussner, I., Poehlein, A., Daniel, R., Finkernagel, F., & Heimel, K. (2019). Signal peptide peptidase activity connects the unfolded protein response to plant defense suppression by Ustilago maydis. *PLOS Pathogens*, *15*(4), e1007734. https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1007734

Quilis, J., Penas, G., Messeguer, J., Brugidou, C., & San Segundo, B. (2008). The Arabidopsis AtNPR1 Inversely Modulates Defense Responses Against Fungal, Bacterial, or Viral Pathogens While Conferring Hypersensitivity to Abiotic Stresses in Transgenic Rice. *Molecular plant-microbe interactions*, *21*(9), 1215–1231.

Quiroz-Figueroa, F. R., Cruz-Mendívil, A., Ibarra-Laclette, E., García-Pérez, L. M., Gómez-Peraza, R. L., Hanako-Rosas, G., Ruíz-May, E., Santamaría-Miranda, A., Singh, R. K., Campos-Rivero, G., García-Ramírez, E., & Narváez-Zapata, J. A. (2023). Cell wall-related genes and lignin accumulation contribute to the root resistance in different maize (Zea mays L.) genotypes to Fusarium verticillioides (Sacc.) Nirenberg infection. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1195794. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1195794

Rajamuthu, R., Tamilselvan, A., Pandian, V., Sooriya Moorthy, L., Vedachallam, V., & Dhandapani, U. (2025). Translating multi-omics insights into Rice Disease Management: Integrative approaches for sustainable resistance. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, *138*, 102694. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.102694

Redkar, A., & Doehlemann, G. (2016). Ustilago maydis Virulence Assays in Maize. *Bio-protocol*, *6*(6), 1–7. https://doi.org/10.21769/BioProtoc.1760.

Salazar-Torres, J. C., Méndez-López, A., Álvarez-Hernández, R., & Sánchez-Vega, M. (2021). *El huitlacoche, alimento prehispánico vigente en México. Historia, aprovechamiento y técnicas de producción* (Primera).

Villanueva-Verduzco, C., Sánchez-Ramirez, E., & Villanueva-Sánchez, E. (2007). *El huitlacoche y su cultivo*. Mundi Prensa.

Yin, B., Xu, L., Li, J., Zheng, Y., Song, W., Hou, P., Zhu, L., Jia, X., Zhao, Y., Song, W., & Guo, J. (2024). Integrated Transcriptome and GWAS Analysis to Identify Candidate Genes for Ustilago maydis Resistance in Maize. *Agriculture*, *14*(958), 1–24. https://doi.org/10.3390/agriculture14060958

Control alternativo de *Trichoderma longibrachiatum* en el cultivo de champiñon

Santiago-Elena, Eduardo[5]; Martínez-Cruz, Julieta[6]; Moreno-Guerrero, Disraeli Eron; Hernández-Cruz, Sergio

Resumen

En la producción de champiñon (*Agaricus bisporus*), la presencia mínima del moho verde (*Trichoderma* spp.,) es sinónimo de contaminación, reduce los rendimientos de champiñon de 30 a 70%, por lo cual este trabajo tiene como objetivo de conocer la eficacia biológica de productos alternativos para el control de *Trichoderma longibrachiatum* en producciones rusticas de champiñón. Durante los meses de marzo a noviembre de 2025, se establecieron dos unidades de producción de champiñon, en la Universidad Autónoma Chapingo. Se utilizo un diseño experimental completamente al azar con 12 tratamientos, cada tratamiento con 6 repeticiones. Los tratamientos utilizados fueron: Cyr Mega (*Larrea tridentata* 95.0%) a 1.5 $mL.L^{-1}$; Cyr Gamma (*Allium sativum* 25.0%+*Capsicum frutescens* 25.0%+*Cinnamomum zeylanicum* 10.0%) a 2.1 $mL.L^{-1}$; Cyr Canela (*Cinnamomum zeylanicum* 15.0%) a 2.1 $mL.L^{-1}$; Cyr Piretrinas (*Tagetes* 90.0%) a 1.8 $mL.L^{-1}$; Cu-Back (Gluconato de cobre 25.0%) a 2.0 $mL.L^{-1}$; Ultralux N (Sales potásicas de soya 50.0%) a 1.5 $mL.L^{-1}$; Programic Mix-Top (Bicarbonato de potasio 85.0%) a 2.4 $mL.L^{-1}$; Cyr Natuactivo (*Chenopodium ambrosioides* 60 %) a 1.5 $mL.L^{-1}$; Cyr Cinna-Neem (*Azadirachta* 55.0%+Extracto de canela 15.0%) a 2.4 $mL.L^{-1}$; Cyr Bioxytrobin (Azoxystrobin 25.0%) a 1.0 $mL.L^{-1}$; Coraza 720S (Clorotalonil 70%) a 1.1 $mL.L^{-1}$ y un testigo absoluto (Agua corriente) con 20 mL, se aplicó una suspensión de 50 mL de los productos a evaluar. Los tratamientos con mayor eficacia fueron Cyr Mega (*Larrea tridentata* 95%) con un 80.34%; Programic Mix Top (Bicarbonato de potasio 85%) con un 77.32% de efectividad y Cyr Bioxystrobin (Azoxystrobin 25%) con un 79.3% de eficacia.

Palabras clave: champiñon, *Trichoderma*, Azoxystrobin, *Larrea,* Bicarbonato.

Abstract

In button mushroom (*Agaricus bisporus*) production, the presence of even minimal amounts of green mold (*Trichoderma* spp.) signifies contamination and reduces mushroom yields by

[5] Departamento de Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Chapingo, México. esantiagoe@chapingo.mx
[6] Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura

30% to 70%; therefore, this study aimed to determine the biological efficacy of alternative products for controlling *Trichoderma longibrachiatum* in lowtech mushroom production systems. Two mushroom production units were established at the Chapingo Autonomous University between March and November 2025. A completely randomized experimental design was used, comprising 12 treatments with 6 replicates each. The treatments applied were: Cyr Mega (*Larrea tridentata* 95.0%) at 1.5 mL·L^{-1}; Cyr Gamma (*Allium sativum* 25.0%+*Capsicum frutescens* 25.0%+ *Cinnamomum zeylanicum* 10.0%) at 2.1 mL·L^{-1}; Cyr Canela (*Cinnamomum zeylanicum* 15.0%) at 2.1 mL·L^{-1}; Cyr Piretrinas (*Tagetes* 90.0%) at 1.8 mL·L^{-1}; Cu-Back (Copper gluconate 25.0%) at 2.0 mL·L^{-1}; Ultralux N (Potassium Soy Salts 50.0%) at 1.5 mL·L^{-1}; Programic Mix-Top (Potassium bicarbonate 85.0%) at 2.4 mL·L^{-1}; Cyr Natuactivo (*Chenopodium ambrosioides* 60%) at 1.5 mL·L^{-1}; Cyr Cinna-Neem (*Azadirachta* 55.0%+ *Cinnamomum zeylanicum* 15.0%) at 2.4 mL·L^{-1}; Cyr Bioxytrobin (Azoxystrobin 25.0%) at 1.0 mL·L^{-1}; A 50 mL suspension of the products to be evaluated was applied to Coraza 720S (Clorotalonil 70%) at 1.1 mL/L and an absolute control (tap water) using 20 mL. The treatments showing the highest efficacy were Cyr Mega (*Larrea tridentata* 95%) at 80.34%, Programic Mix-Top (Potassium bicarbonate 85.0%)with 77.32% effectiveness, and Cyr Bioxystrobin (Azoxystrobin) (25%) with 79.3% efficacy.

Keywords: Mushroom, *Trichoderma*, Azoxystrobin, *Larrea*, Bicarbonate.

Introducción

En México, en 1945 se logra la primera producción estable y constante de champiñón; En el estado de México, en el municipio de Texcoco con un rendimiento diario de entre 10 y 15 kg. En 1947 se crea una asociación de la cual nace la empresa Hongos de México, lo que hoy se conoce como grupo Monte Blanco. En el caso del champiñón blanco (*Agaricus bisporus*) es la más explotada por su tamaño, que va de los 5 a 12 cm de diámetro, con una forma achatada y carnosa del carpóforo. Durante el proceso de cultivo de la mayoría de los hongos comestibles se presentan problemas de contaminación, principalmente por los mohos que proliferan por las condiciones de humedad y temperatura, necesarias para el desarrollo y fructificación de los hongos comestibles (Oei, 1991), siendo los principales contaminantes *Aspergillus* sp; *Neurospora* sp; *Penicillium* sp. y *Trichoderma* sp., (Fernández, 2005).

El moho verde, causado por varias especies de *Trichoderma* spp. es la enfermedad más agresiva en producciones de champiñon, la cual puede ocasionar sustanciales pérdidas económicas y en la producción que pueden ir desde el 30 hasta el 100% (Samuels et al., 2002), de no controlarse puede acabar con las producciones en su totalidad, ya que el micelio de este ascomiceto es capaz de crecer encima del micelio de champiñón, incluso encima de los esporomas convirtiéndose en un micoparásito (Samuels *et* al., 2002).

La incidencia de este patógeno tiene una infección inicial en el desarrollo de un micelio blanquecino muy difícil de diferir del micelio de champiñón, por lo que en esta etapa es prácticamente imposible diferenciarlos. Al paso de las horas, va madurando cambia rápidamente a un moho verde oscuro y en su etapa de esporulación tiene el color más intenso, pero el tono verde varia por deshidratación y la intensidad de la luz incidente. En su etapa de esporulación, coloniza rápidamente la superficie del sustrato de cobertura y puede crecer en los carpóforos del champiñón debido a que sus esporas tienen sustancias pegajosas que les permite adherirse, las conidios crecen y maduran rápidamente a los cinco días de incubación a una temperatura de 25° C. Generalmente estas especies prosperan en un pH ácido de 4.5 a 5, este hongo prefiere el contenido excesivo de humedad y un estancamiento de dióxido de carbono en la atmosfera por lo que es importante una constante y correcta ventilación (4 a 5 renovaciones/hora) (Pinzón, 2009). El control de esta enfermedad se da regularmente con tratamientos de fungicidas autorizados como procloraz y metrafenona en Europa y clorotalonil, tiabendazol y tiofanato de metilo en América del Norte (EFSA, 2013). En las últimas décadas se ha observado el creciente desarrollo de resistencia en patógenos, además de la restricción en el uso de fungicidas químicos por el aumento en el impacto sobre el medio ambiente y la salud humana, por lo que esta investigación tiene como objetivo evaluar la sensibilidad biológica de productos alternativos aplicados para el manejo de *Trichoderma longibrachiatum* en esporomas de champiñón (*Agaricus bisporus*).

Materiales y métodos

El experimento se realizó de marzo a noviembre de 2025, en el módulo experimental de Agroecologia, "Jurasico" y en el Laboratorio Institucional de Hongos Comestibles de la Universidad Autónoma Chapingo (UACh). El compost formulado se preparó con rastrojo de maíz (70%), estiércol de caballo (15%), Salvado de trigo (5%), Alfalfa achicalada (4%), Yeso (4%) y urea (2%), después de la siembra de micelio de champiñon (3 % de peso total del sustrato), se aplicaron los productos a evaluar. Se utilizo un diseño experimental completamente al azar, cada tratamiento con 6 repeticiones. Los tratamientos utilizados se describen en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Productos biorracionales de la empresa CyrAgro utilizados para evitar las contaminaciones de *Trichoderma longibraquiatum* en producciones rusticas de champiñon (*Agaricus bisporus*).

Tratamiento	Producto comercial/ Ingrediente activo	Dosis
T1	Cyr Mega (*Larrea tridentata*) (95.0%)	1.5 $mL.L^{-1}$

T2	Cyr Gamma (Extracto de ajo (*Allium sativum*) (25.0%), extracto de Chile picante (*Capsicum frutescens*) (25.0%) y extracto de canela (*Cinnamomum zeylanicum*) (10.0%))	2.1 $mL.L^{-1}$
T3	Cyr Canela (*Cinnamomum zeylanicum*) (15.0%)	1.8 $mL.L^{-1}$
T4	Cyr Piretrinas (*Tagetes* spp.) (90.0%)	2.0 $mL.L^{-1}$
T5	Cu-Back (Gluconato de cobre) (25.0%)	1.5 $mL.L^{-1}$
T6	Ultralux N (Sales potásicas de soya) (50.0%)	2.1 $mL.L^{-1}$
T7	Programic Mix Top (Bicarbonato de potasio agrícola) (85.0%)	2.4 $mL.L^{-1}$
T8	Cyr Natuactivo (*Chenopodium ambrosioides*) (60 %)	1.5 $mL.L^{-1}$
T9	Cyr Cinna-Neem (Extracto de neem (55.0%) + Extracto de canela (15.0%)	2.4 $mL.L^{-1}$
T10	Cyr Bioxytrobin (Azoxystrobin) (25.0%)	1.0 $mL.L^{-1}$
T11	Testigo comercial. Coraza 720S (Clorotalonil) (70%)	1.1 $mL.L^{-1}$
T12	Testigo absoluto (Agua corriente)	20 mL

A los siete días después de la aplicación de los productos a evaluar en champiñón, se asperjo 50 mL de *Trichoderma longibrachiatum* ($1x10^6$ conidios.mL^{-1}). Se evaluó la severidad de la enfermedad, estimando de manera visual la escala de daño y transformándola en porcentaje con la fórmula de Abbott (1925).

Resultados y discusiones

Con base en las figuras 1 y 2. Los tratamientos con mejores eficacias fueron el producto Cyr Mega (95%) donde el extracto de gobernadora *(Larrea tridentata*) presento un 80.34% de eficacia en comparación con el testigo absoluto (agua corriente) 5.2%, esto puede deberse a lo obtenido por Lira-Saldivar *et al.*, (2003), donde el extracto de *Larrea* a concentraciones de 1000 y 2000 ppp, afecta en un 55% a los conidios de *Botrytis cinerea, Colletotrichum coccodes* y *Fusarium oxysporum* f. sp. *licopersici,* aislados de rosas de invernadero y de lotes comerciales de papa y tomate. Mientras que Jasso *et al.,* (2007) reportaron que a 4000 ppm presentó inhibición para *Colletotricum gleosporides* en un 100%, *Alternaria alternata* en un 66.4% y *Rhizopus* sp., en un 78.9%.

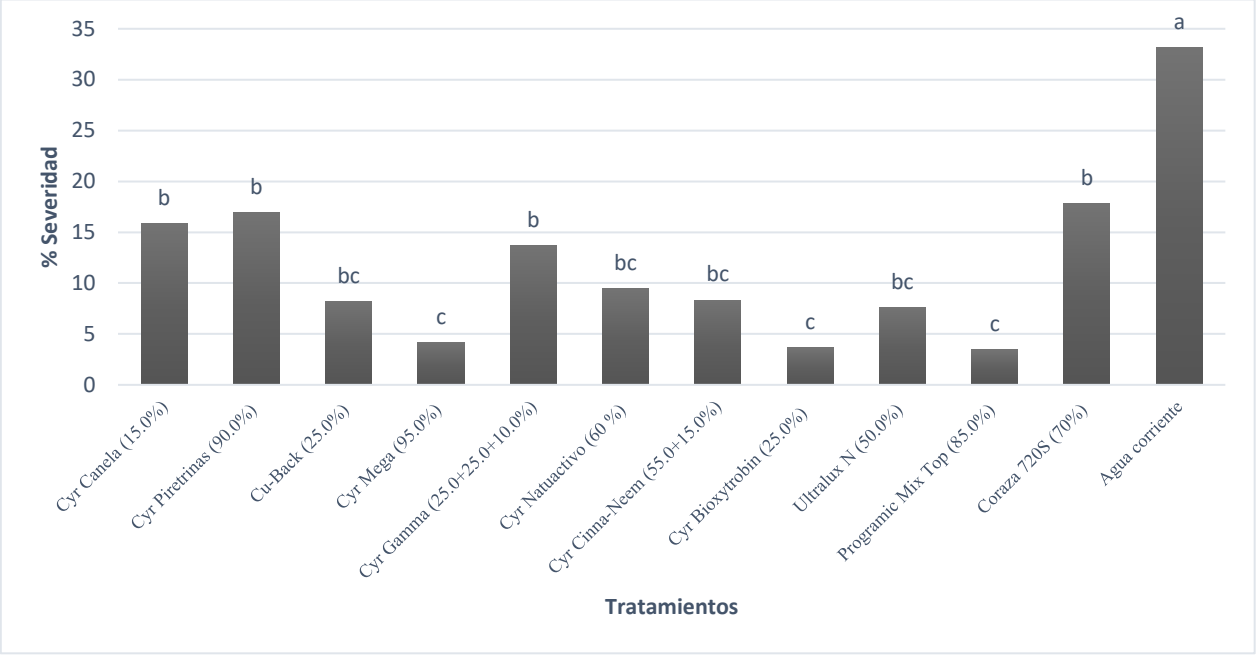


Figura 1. Porcentaje de severidad de *Trichoderma longibraquiatum* en bolsas de producción rustica de champiñón (*Agaricus bisporus*) de 10 kg de peso, después de la última aplicación de los tratamientos.

Lo cual se asemeja con el resultado obtenido en el presente experimento, donde se vio afectado la esporulación de *T. longibraquiatum*, de forma preventiva en esporomas y tierra de cobertura. Tequida-Meneses *et al.,* (2002) reportan que extractos alcohólicos de *L. tridentata* inhibieron el crecimiento de *Aspergillus flavus, A. níger, Penicilium chrysogenum, P. expansum, Fusarium poae* y *F. moniliforme* en un rango de 41.5% hasta 90%.

Con un 77.32% de efectividad biológica tenemos al producto comercial Programic Mix-Top cuyo ingrediente activo es Bicarbonato de potasio agrícola al 85% (Fig. 2), esto puede deberse a que los bicarbonatos a base de potasio (BP) y sodio (BS), son sales ubicuas en la naturaleza, y pueden encontrarse en prácticamente todos los organismos vivos, incluso, en componentes ambientales como el agua y el suelo (Deliopoulos *et al*., 2010), por lo que en el agua que se utiliza para regar los esporomas se puede aplicar los bicarbonatos sin afectar el pH del sustrato pasteurizado. Otras ventajas que según Ilhan *et al*., (2006) reportan que el bicarbonato de sodio al 0.5% inhibe la germinación de conidios y la elongación del tubo germinativo de *Venturia inaequalis* en 59 y 92.3%, respectivamente. Karabulut et al. (2003)

lograron mayor disminución del número de frutos podridos por *Botrytis cinerea, Alternaria spp.* y *Aspergillus niger* en racimos de uvas tratados con bicarbonato de potasio al 2%.

Los resultados obtenidos en la presente investigación coinciden con lo reportado por Ilhan *et al*., (2006) y Deliopoulos *et al*., (2010), señalan que las propiedades antifúngicas de los bicarbonatos se obtienen cuando se aplican al follaje de plantas a dosis de 5 y 10 $g.L^{-1}$. Asimismo, estudios de Hasan *et al*., (2012), demuestran que los bicarbonatos actúan contra los hongos, al inhibir la germinación de esporas y la formación del tubo germinativo, también disminuyen su capacidad en la formación de esporas. Cuando se aplicó el bicarbonato de potasio agrícola en esporomas de 3 cm de champiñon, se vieron afectado los conidios de *Trichoderma* sp., sin dejar lesiones en la cutícula de los champiñones.

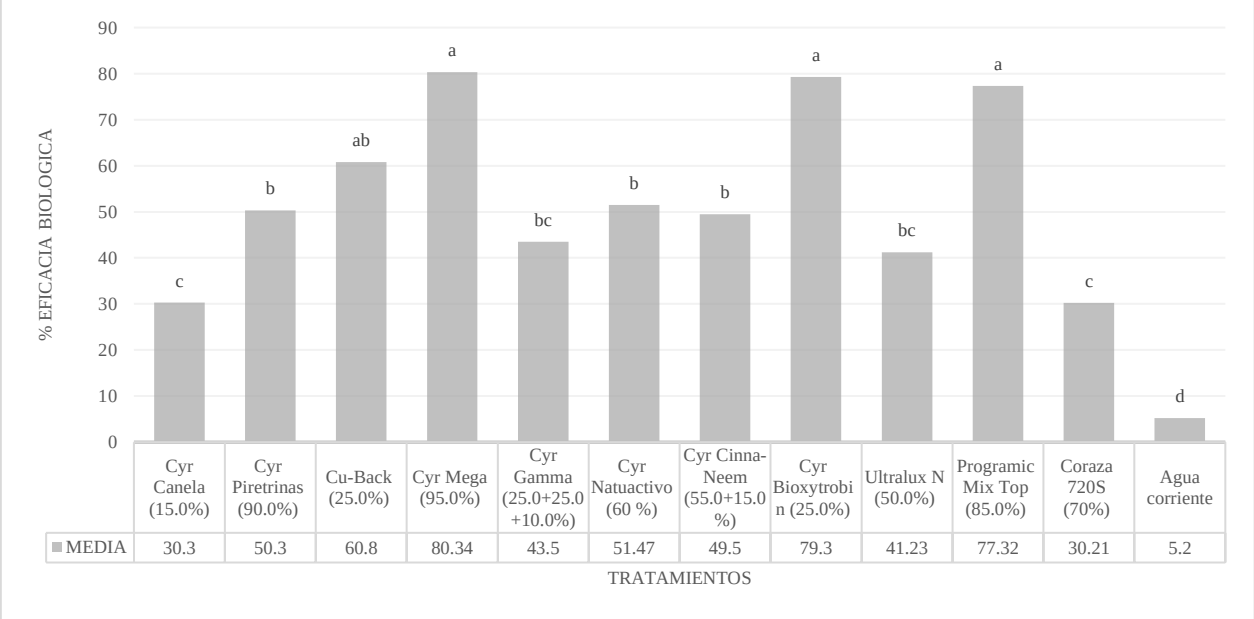


Figura 2. Porcentaje de efectividad biológica de los tratamientos para el control de *Trichoderma longibraquiatum,* en producciones rusticas de champiñon. Barras con letras distintas presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, P≤0.05).

En el caso del testigo comercial el producto, Y Cyr Bioxystrobin (Azoxistrobin, 25%) presento un 79.3% de eficacia (Fig. 2), donde la esporulación de *Trichoderma* spp., se vio afectada considerablemente y solo quedaron lesiones cafés en el esporoma de champiñon debido a que las estrobirulinas presenta un espectro de actividad muy amplio y es eficaz contra patógenos fúngicos de los cuatro grupos taxonómicos: oomicetos, ascomicetos , deuteromicetos y basidiomicetos, este espectro es

porque el sitio de acción de azoxistrobin (25%) es la mitocondria fúngica, donde se une al citocromo bc. El complejo impide el transporte de electrones y la producción de energía mediante fosforilación oxidativa (Robert, 1999).

Dentro del experimento los tratamientos con eficacias, menores al 50% fueron los productos: Cyr Piretrinas (*Tagetes* spp., 90.0%) con un 50.3% (Fig. 2), donde los aceites esenciales de naturaleza terpénica, *trans*tagetona, ß-ocimeno, ß-cariofileno, verbenona y *cis*-verbenona, pueden presentar propiedades antifúngicas (Mendoza, 2015), pero en el experimento solo afectaron al 50% de la población sometida a un bioensayo, por lo que aun asi se desarrolló esporulación en los carpóforos de champiñon, que seria inoculo para la nueva infección de *Trichoderma* sp. en bolsas de producción comerciales.

El tratamiento con Cyr Natuactivo (*Chenopodium ambrosioides*, 60%) presento un 51.47% (Fig. 2), donde el α-terpineno (60,29 %), seguido de p-cimeno (20,49 %), 4-careno (7,96 %) y trans-ascaridol (1,91 %). *C. ambrosioides* fue activo contra *Fusarium oxysporum* con un porcentaje de inhibición micelar de 97,3 % a 176,5 µL de aceite esencial/litro de aire, leído a las 72 h; y un porcentaje de mortalidad contra *Sitophilus zeamais* de 100 % a 500 µL de aceite esencial/litro de aire, después de 24 h de exposición. El porcentaje de inhibición del radical DPPH fue de 84,89 % (Prasad *et al.,* 2010).

Para el caso del producto Cyr Cinna-Neem, tiene como ingredientes activos extracto de neem (55.0%) más extracto de canela (15.0%) presento una eficacia de 49.5% (Fig. 2), esto puede deberse a que los extractos acuosos de hojas de neem aumentan la hidrofobicidad superficial en las células de *Candida albicans*. Se encontró que los extractos metanólicos de semillas de azadiractina inhiben la biosíntesis de ergosterol de *Aspergillus parasiticus;* este efecto podría atribuirse a la inhibición de las enzimas involucradas en la vía biosintética del ergosterol (Kavitha *et al.,* 2014), afectando principalmente a hongos saprofitos.

Los tratamientos con menor eficacia fueron Cyr Canela (*Cinnamomum zeylanicum*, 15.0%) presentando un 30.3% de eficacia (Fig. 2), lo cual no coincide con lo reportado por Montes-Belmont y Carvajal (1998), encontraron que *Aspergillus flavus* fue completamente inhibido por *C. zeylanicum*, también se ha considerado como fungicida contra hongos fitopatógenos como *Colletotrichum musae* , *Lasiodiplodia thebromae* y *Fusarium proliferatum*, aislados de plátanos. Tambien fue reportado como antifúngico contra *Oidium murrayae* y aprovechó la germinación de conidios de *Colletotrichum gloesporioides* (Barrera-Necha, 2008), estos reportes están experimentados principalmente en plantas cultivadas.
Cyr Gamma (25+25+10%) el cual es una mezcla de extracto de ajo (*Allium sativum*) (25.0%), extracto de Chile picante (*Capsicum frutescens*) (25.0%) y extracto de canela (*Cinnamomum*

zeylanicum 10.0%) presento un 43.5% de eficiencia (Fig. 2), donde los aceites esenciales de ajo contienen principalmente dialil sulfuro y dialil disulfuro, a dosis de 229 ppm y 1,023 ppm, afectan la germinación de esporas del hongo en 88.89 y 94.17%, contra *Alternaria tenuissima.* Lo cual no se vio reflejado en el tratamiento contra *Trichoderma* sp. Además de que el tratamiento tiene un olor que perdura en los esporomas de champiñon (Casella *et al.*, 2013). El extracto de chile (*Capsicum annum*) logró inhibir el crecimiento micelial de *Moniliophthora roreri* más del 90 %, mediante los extractos que fueron obtenidos con solvente acetato de etilo al 62 %, a una temperatura de 75 °C; por lo que se consideran como materia prima potencial para la producción de biofungicidas, lo cual no se vio reflejado en el experimento (Murcia, 2024).

Coraza 720S (70%) con un 30.21% (Fig. 2), donde el ingrediente activo es Clorotalonil, fungicida foliar no sistémico con acción preventiva, de amplio espectro tiene acción multisitio dentro de las células del hongo, se adhiere a los grupos–SH de las moléculas de los aminoácidos. Ya que estos son la base de las proteínas celulares tales como las enzimas, bloquea mucho de los procesos metabólicos importantes de las células del hongo. Como resultado la célula fungosa no produce energía, causando la muerte del hongo. Clorotalonil evita la germinación de esporas y detiene el crecimiento micelial del hongo. Lo cual no se vio reflejado en el experimento (Baćmaga *et al*., 2018).

Conclusiones

Los tratamientos Cyr Mde champiñón*ridentata*) (95%) con un 80.34%; Programic Mix Top (Bicarbonato de potasio agrícola) (85%) con un 77.32% de efectividad y Cyr Bioxystrobin (Azoxystrobin) (25%) con un 79.3% de eficacia pueden considerarse como productos alternativos para el control de forma preventiva de *Trichoderma longibraquiatum*, pero también se puede considerar a Cyr Natuactivo (*Chenopodium ambrosioides*, 60%) presento un 51.47%, Cyr Cinna-Neem, (extracto de neem 55.0% más extracto de canela 15.0%) con un 49.5% de eficacia para el manejo del patógeno, y darle una mayor protección a las producciones rusticas de champiñón en etapa de esporoma maduro respetando el límite máximo de residuos en productos frescos.

Literatura citada

Abbott, W. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. Journal of Economic Entomology, 18, 256-267.

Baćmaga, M., Wyszkowska, J. & Kucharski, J. (2018). The influence of chlorothalonil on the activity of soil microorganisms and enzymes. *Ecotoxicology,* 27, 1188–1202. https://doi.org/10.1007/s10646-018-1968-7

Barrera, N. L. L., Bautista, B. S., Flores, M. H. E., Rojas, E. A. (2008). Efficacy of essential oils on the conidial germination, growth of *Colletotrichum gloeosporioides* (Penz.) Penz. and Sacc and control of postharvest diseases in papaya (Carica papaya L.) Plant Pathol. J. 7:174–178. doi: 10.3923/ppj.2008.174.178.

Casella, S. Leonardi M, Melai B, Fratini F and Pistelli L. (2013). The role of diallyl sulfides and dipropyl sulfides in the *in vitro* antimicrobial activity of the essential oil of garlic, *Allium sativum* L., and leek, *Allium porrum* L. Phytotherapy Research 27: 380-383. https://dx.doi.org/10.1002/ptr.4725

Deliopoulos, T.; Kettlewell, P. S. and Hare, M. C. (2010). Fungal disease suppression by inorganic salts: a review. Crop Protection.29(10):1059-1075

European Food Safety Authority. (2013). Reasoned opinion on the modification of the existing MRLs for metrafenone in various crops. *EFSA Journal*.11(1):3075.

Fernández, M. (2005). Manual práctico de producción de champiñón, apuntes recopilación de datos y experiencias adquiridas en el cultivo comercial de champiñones pag. 4-13. http://www.grupofungitech.com/manual2.pdf.

Hasan, M. F.; Mahmud, T. M. M.; Kadir, J.; Ding, P. and Zaidul, I. S. M. (2012). Sensitivity of *Colletotrichum gloeosporioides* to sodium bicarbonate on the development of anthracnose in papaya(*Carica papaya* L. cv. Frangi). Aus. J. Crop Sci. 6(1):17-22.

Ilhan, K.; Arslan, U.; Karabulut, O. A. (2006). The effect of sodium bicarbonate alone or in combination with a reduced dose of tebuconazole on the control of apple scab. Crop Protec. 25:963-967.

Jasso, R., D., Rodríguez, G. R., Hernández, C., F. D., Villarreal Quintanilla, J.A., Galván-Cendejas, A., (2007). Antifungal effects *in vitro* of semiarid plant extracts against post-harvest fungi. AAIC Annual Meeting: Bringing Industrial Crops into the Future. October 7-10. Portland, Maine.

Mendoza, G. E. E. (2015). Compatibilidad de extractos vegetales con el parasitoide *Tamarixia radiata* (Hymenoptera: Eulophidae) en el control de *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae). Colegio de Posgraduados. Instituto de Fitosanidad, Entomología y Acaralogía.

Montes-Belmont R., Carvajal M. (1998). Control of *Aspergillus flavus* in maize with plant essential oils and their components. J. Food Prot. 61:616–619. doi: 10.4315/0362-028X-61.5.616

Murcia Artunduaga, K. S., Maca, A. V., Suarez Collazos , K. & Castañeda , M. del R. (2024). Optimización del efecto antifúngico de extractos de ají (*Capsicum frutescens*) sobre el crecimiento in vitro de Moniliophthora roreri, causante de la moniliasis en cacao. *Acta Agronómica*, *72*(2), 188–195. https://doi.org/10.15446/acag.v72n2.110673

Karabulut, O. A.; Smilanick, J. L.; Mlikota Gabler, F.; Mansour, M. and Droby, S. (2003). Near harvest applications of Metschnikowia fructicola, ethanol, and sodium bicarbonate to control postharvest diseases of grape in central California. Plant Dis.87:1384-1389.

Kavitha, G.; Karuna, R.; Sashidhar, R. B. (2014). Inhibitory Role of Neem Seed Kernel Extracts and Terpenoids on Growth and Aflatoxin Production by *Aspergillus parasiticus* (NRRL 2999). Ind J Nat Prod Resour;5(1):20-33.

Lira-Saldivar, R.H., (2003). Estado Actual del Conocimiento Sobre las Propiedades Biocidas de la Gobernadora (*Larrea tridentata* (D.C.) Coville). Revista Mexicana de Fitopatología, 21: 214222.

Prasad, C. S.; Shukla, R.; Kumar, A.; Dubey, N. K.; (2010). In vitro and in vivo antifungal activity of essential oils of *Cymbopogon martini* and *Chenopodium ambrosioides* and their synergism against dermatophytes. Mycoses;53(2):123-9.

Robert, S. I. J.(1999). Metabolism of Azoxystrobin in Plants and Animals.Food Science, Technology and Nutrition, Pesticide Chemistry and Bioscience, p.p. 265-278. doi.org/10.1533/9781845698416.6.265.

Samuels, G. J; Dodd, S. L; Gamas, W; Castlebury L. A; Petrini O. (2002). Especies de *Trichoderma* asociadas con la epidemia de moho verde de *Agaricus bisporus* cultivado comercialmente. Rev Micología. 94, 1-2

Pinzón, G. Y. A; Bustamante, S. L; Buitrago, G. (2009). Evaluación de métodos para la conservación de hongos fitopatógenos. Rev. Colombiana de Biotecnología., Volumen 11, Número 2, p. 143-151,

Tequida, M. M., Cortez, R. M., Rosas, B. E. C., López, S. S., Corrales, M. C. (2002). Efecto de extractos alcohólicos de plantas silvestres sobre la inhibición de crecimiento de *Aspergillus flavus, Aspergillus niger, Penicillium chrysogenum, Penicillium expansum, Fusarium moniliforme* y *Fusarium poae*. Revista Iberoamericana de Micología 19, 84-88.

Oei, P. (1991). Manual of mushoom cultivator. Tool Foundation, Amsterdam. 249 p.

Efecto de *Trichoderma* spp. en precosecha y del agua activada por plasma en el manejo poscosecha de *Botrytis cinerea* en fresa

Juan Pablo Zavala Mendoza[7], Nadia Landero Valenzuela[8], José Antonio Flores Gonzalez[9], Gustavo Soria Argüello[10]

Resumen

La fresa (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) es uno de los cultivos hortofrutícolas de mayor importancia económica; sin embargo, su alta susceptibilidad a enfermedades poscosecha, particularmente la pudrición gris causada por *Botrytis cinerea*, ocasiona pérdidas significativas y limita su comercialización. El experimento se desarrolló en dos etapas. En la fase de campo se evaluó el efecto de diferentes tratamientos con *Trichoderma* spp. sobre el crecimiento y rendimiento de plantas de fresa establecidas en invernadero bajo un diseño de bloques completos al azar. Posteriormente, los frutos cosechados fueron aleatorizados para evaluar distintos tiempos de inmersión en agua activada por plasma (AAP), inoculados con *Botrytis cinerea* y almacenados bajo condiciones controladas para determinar la incidencia y severidad de la enfermedad. Los resultados mostraron que el tratamiento con cinco minutos de exposición al agua activada por plasma presentó la menor incidencia y severidad de *Botrytis cinerea*, retrasando el desarrollo de la enfermedad durante el almacenamiento. En campo, la altura de las plantas no presentó diferencias significativas entre tratamientos ($P > 0.05$), aunque *T. asperellum* registró los mayores valores promedio, mientras que el rendimiento tampoco mostró diferencias significativas. Se concluye que el agua activada por plasma constituye una alternativa promisoria para el manejo poscosecha de la pudrición gris en fresa y que la inoculación con *Trichoderma* spp., bajo las condiciones evaluadas, no modificó significativamente el crecimiento ni el rendimiento del cultivo.

Palabras clave: agua activada por plasma, pudrición gris, poscosecha, fresa, control alternativo.

[7] Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. Correo: juanpablozm30@outlook.com
[8] Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. Correo: nadialandero00@gmail.com
[9] Departamento de Horticultura, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. Correo: jagf252001@gmail.com
[10] Centro de investigación de química aplicada, Saltillo, Coahuila, México. Correo: gustavo.soria@ciqa.edu.mx

Abstract

The strawberry (Fragaria × ananassa Duch.) is one of the most economically important fruit and vegetable crops; however, its high susceptibility to post-harvest diseases, particularly gray mold caused by *Botrytis cinerea*, results in significant losses and limits its marketability. The experiment was conducted in two stages. In the field phase, the effect of different treatments with Trichoderma spp. on the growth and yield of strawberry plants grown in a greenhouse was evaluated using a completely randomized block design. Subsequently, the harvested fruits were randomized to evaluate different immersion times in plasma-activated water (PAW), inoculated with *Botrytis cinerea* and stored under controlled conditions to determine the incidence and severity of the disease. The results showed that treatment with five minutes of exposure to plasma-activated water resulted in the lowest incidence and severity of *Botrytis cinerea*, delaying disease development during storage. In the field, plant height did not show significant differences among treatments ($P > 0.05$), although *T. asperellum* recorded the highest average values, while yield also showed no significant differences. It is concluded that plasma-activated water is a promising alternative for the postharvest management of gray mold in strawberries and that inoculation with *Trichoderma spp*., under the conditions evaluated, did not significantly affect crop growth or yield.

Keywords: plasma-activated water, gray mold, postharvest, strawberry, alternative postharvest management.

Introducción

La fresa (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) es uno de los cultivos hortofrutícolas de mayor importancia económica a nivel mundial debido a su elevado valor comercial, amplia aceptación por los consumidores y destacadas propiedades nutracéuticas. Su fruto constituye una fuente importante de vitamina C, compuestos fenólicos, flavonoides y antocianinas, metabolitos con reconocida actividad antioxidante y beneficios para la salud humana (Martínez-Cruz et al., 2011). De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la producción mundial de fresa ha mostrado un crecimiento sostenido durante la última década impulsado por el incremento en la demanda de fruta fresca y productos procesados (*FAOSTAT*, 2025.). En México, este cultivo representa una de las principales berries de importancia económica, concentrándose la producción en estados como Michoacán, Baja California, Guanajuato y Jalisco, donde constituye una

actividad estratégica para el mercado nacional y de exportación (*Dirección General Del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera | Gobierno | Gob.Mx*, 2025.).

A pesar de su importancia económica, la fresa es considerada un fruto altamente perecedero debido a su elevada tasa respiratoria, contenido de humedad y delicada estructura epidérmica, características que favorecen pérdidas significativas durante el almacenamiento, transporte y comercialización (Zheng et al., 2022). Entre los principales factores responsables de estas pérdidas destacan las enfermedades poscosecha ocasionadas por hongos fitopatógenos, siendo la pudrición gris causada por *Botrytis cinerea* Pers. uno de los problemas fitosanitarios de mayor impacto económico a nivel mundial (Momtaz et al., 2025). Este patógeno posee la capacidad de infectar flores y frutos durante el desarrollo del cultivo, permaneciendo latente hasta que las condiciones de humedad y temperatura favorecen su desarrollo durante la poscosecha, ocasionando pérdidas que pueden superar el 50 % de la producción cuando no se implementan estrategias de manejo adecuadas (Weber & Petridis, 2023).

El manejo convencional de *B. cinerea* se basa principalmente en la aplicación preventiva y curativa de fungicidas sintéticos. Sin embargo, el uso continuo de estos productos ha favorecido la aparición de poblaciones resistentes, disminuyendo progresivamente su eficacia y limitando las opciones disponibles para el control del patógeno (Weber & Petridis, 2023). Adicionalmente, existe una creciente preocupación por la presencia de residuos químicos en los frutos, los riesgos ambientales derivados del uso intensivo de plaguicidas y las restricciones impuestas por los mercados de exportación, lo que ha impulsado el desarrollo de tecnologías alternativas más sostenibles para el manejo de enfermedades poscosecha (Lopes et al., 2014).

Entre las alternativas emergentes destaca el agua activada por plasma (AAP), una tecnología no térmica obtenida mediante la interacción entre una descarga de plasma frío y el agua. Durante este proceso se generan diversas especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (ROS y RNS), como peróxido de hidrógeno, ozono, radicales hidroxilo, nitritos y nitratos, compuestos capaces de ejercer actividad antimicrobiana mediante la alteración de membranas celulares, proteínas y ácidos nucleicos de diversos microorganismos fitopatógenos (Yang et al., 2023). Además de su efecto desinfectante, la AAP presenta la ventaja de no dejar residuos tóxicos sobre los alimentos y de degradarse en compuestos

inocuos, características que la convierten en una alternativa compatible con sistemas de producción agrícola sostenibles (Lin et al., 2024).

Diversos estudios han demostrado que la aplicación de tecnologías basadas en plasma frío y agua activada por plasma contribuye a disminuir la incidencia de enfermedades poscosecha y a preservar atributos de calidad como firmeza, contenido de compuestos antioxidantes y vida útil en frutos frescos (Lin et al., 2024). Sin embargo, la información relacionada con su aplicación en frutos de fresa inoculados con *B. cinerea* aún es limitada, particularmente bajo las condiciones de producción y almacenamiento presentes en México, por lo que resulta necesario generar evidencia experimental que permita valorar su potencial como herramienta de manejo fitosanitario. Se planteó como hipótesis que la inoculación con *Trichoderma* spp. favorecería el desarrollo vegetativo del cultivo y que la aplicación de agua activada por plasma reduciría la incidencia y severidad de *Botrytis cinerea* durante el almacenamiento poscosecha, constituyendo una estrategia sostenible para el manejo de esta enfermedad. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el efecto del agua activada por plasma sobre la incidencia y severidad de *Botrytis cinerea* en frutos de fresa durante el almacenamiento poscosecha, con la finalidad de generar información que contribuya al desarrollo de estrategias sostenibles para el manejo de la pudrición gris y a la reducción del uso de fungicidas sintéticos en este cultivo.

Materiales y métodos

Sitio experimental y material vegetal

El experimento se realizó durante el ciclo agrícola, entre febrero y julio 2026 en el departamento de Horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México (25°21' N, 101°02' O; 1,742 m s.n.m.). El material vegetal utilizado correspondió a plantas de fresa (*Fragaria* × *ananassa* Duch.) variedad Albión, establecidas bajo condiciones de producción protegida, de acuerdo con el manejo agronómico convencional empleado en la unidad experimental. Las plantas se mantuvieron bajo un programa de fertilización, riego y manejo fitosanitario acorde con las recomendaciones técnicas para el cultivo.

Diseño experimental

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar, conformado por cinco tratamientos y cuatro bloques, para un total de 20 unidades experimentales. Cada unidad experimental estuvo integrada por cinco plantas de fresa establecidas en macetas individuales, dando un total de 100 plantas evaluadas. Los tratamientos consistieron en la aplicación de dos cepas de *Trichoderma spp. (Harzianum y Asperellum)* y un manejo convencional, distribuidos aleatoriamente dentro de cada bloque para minimizar la variabilidad asociada a las condiciones del invernadero.

Tabla 1 Descripción de tratamientos en campo

Tratamiento	Descripción
T1	*T. Harzianum* (riego con agua)
T2	*T. Asperellum* (riego con agua)
T3	Convencional
T4	*T. Harzianum* (riego con solución nutritiva)
T5	*T. Asperellum* (riego con solución nutritiva)

Fuente: Propia autoría

Manejo agronómico del cultivo

Las plantas fueron establecidas en bolsas de seis litros, con un sustrato compuesto de peat moss y vermiculita en una relación 70:30 repectivamente. Durante el desarrollo del cultivo se realizaron las labores culturales correspondientes, incluyendo fertirrigación, eliminación de estolones, control de malezas y monitoreo fitosanitario, procurando mantener condiciones homogéneas entre todas las unidades experimentales.

Como parte del manejo biológico del cultivo, las plantas recibieron las aplicaciones correspondientes de *Trichoderma spp.* conforme al esquema establecido para el ensayo en campo, con el propósito de favorecer el desarrollo vegetal y disminuir la presión de enfermedades radiculares durante el ciclo de producción. Las prácticas agronómicas fueron las mismas para todas las plantas utilizadas posteriormente en la evaluación poscosecha.

Obtención de frutos

Los frutos fueron cosechados manualmente en estado de madurez comercial, seleccionando únicamente aquellos que presentaron madurez uniforme, ausencia de daños mecánicos, deformaciones o síntomas visibles de enfermedades. Posteriormente fueron transportados al laboratorio en recipientes limpios para iniciar las evaluaciones poscosecha.

Preparación del inóculo de *Botrytis cinerea*

El aislamiento de *Botrytis cinerea* empleado en este estudio fue obtenido de frutos de fresa con síntomas característicos de pudrición gris y conservado en el laboratorio de Horticultura de la UAAAN. El hongo fue reactivado en medio de cultivo Papa Dextrosa Agar (PDA) e incubado a 28 ± 2 °C durante 8 días, hasta obtener un crecimiento abundante y producción de conidios.

La suspensión de conidios se preparó adicionando agua destilada estéril sobre las colonias y desprendiendo las esporas mediante raspado suave con una espátula estéril. Posteriormente, la suspensión fue filtrada para eliminar restos de micelio y ajustada a una concentración aproximada de 1×10^5–10^6 conidios mL^{-1} utilizando una cámara de Neubauer.

Preparación del agua activada por plasma

El agua activada por plasma (AAP) se obtuvo mediante el tratamiento de agua desionizada utilizando un reactor de plasma tipo jet operado a presión atmosférica. Para cada ensayo se colocó 1 L de agua desionizada en un cristalizador de vidrio con capacidad de 2 L.

El plasma fue generado mediante una fuente de alimentación de corriente alterna (AC) de alto voltaje operando a una frecuencia de 65 kHz. Como gas de trabajo se empleó aire comprimido seco con un flujo constante de 20 L min^{-1}, controlado mediante un flujómetro. La potencia de operación se fijó en 160 W durante todo el tratamiento.

El reactor de plasma tipo jet se colocó en configuración sumergida, con la boquilla orientada verticalmente hacia abajo e inmersa aproximadamente 10 mm por debajo de la superficie del agua. Esta disposición permitió que las especies reactivas generadas en la descarga fueran transferidas directamente al volumen del líquido, favoreciendo la formación de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (ROS/RNS), así como la mezcla inducida por el propio flujo gaseoso, sin necesidad de agitación mecánica adicional.

El tratamiento se llevó a cabo durante 10 min en condiciones ambientales (≈25 °C). Durante este periodo, el plasma interactuó continuamente con el agua, promoviendo la formación de agua activada por plasma mediante la disolución y reacción de especies reactivas provenientes de la fase gaseosa.

Tratamientos poscosecha

Los frutos fueron distribuidos aleatoriamente en los tratamientos correspondientes al tiempo de exposición al agua activada por plasma. Cada tratamiento consistió en la inmersión de los frutos en AAP durante el tiempo establecido, mientras que el tratamiento testigo fue sumergido en agua destilada estéril.

Posteriormente, los frutos fueron inoculados con la suspensión de *B. cinerea* mediante la aplicación de 1000 µL sobre la superficie del fruto y colocados en cámaras húmedas con humedad relativa superior al 90 %, favoreciendo el desarrollo del patógeno durante el almacenamiento.

Los tratamientos evaluados fueron:

Tabla 2 Tiempo de los tratamientos poscosecha

Tratamiento	Tiempo de inmersión
T0	Testigo, agua destilada (1 min)
T1	Agua activada por plasma (1 min)
T2	Agua activada por plasma (3 min)
T3	Agua activada por plasma (5 min)
T5	Agua activada por plasma (10 min)

Fuente: Propia autoría

Condiciones de almacenamiento

Después de la inoculación, los frutos fueron almacenados en cámaras bajo condiciones controladas de temperatura (20 ± 2 °C) y humedad relativa (90 %) durante el periodo experimental. Durante el almacenamiento se realizaron evaluaciones periódicas para registrar

el desarrollo de la enfermedad y la respuesta de los tratamientos con fotografías para analizarse posteriormente en la aplicación de ImageJ,

Variables evaluadas

La incidencia de la enfermedad se determinó como el porcentaje de frutos que presentaron síntomas visibles de pudrición gris respecto al número total de frutos evaluados en cada tratamiento.

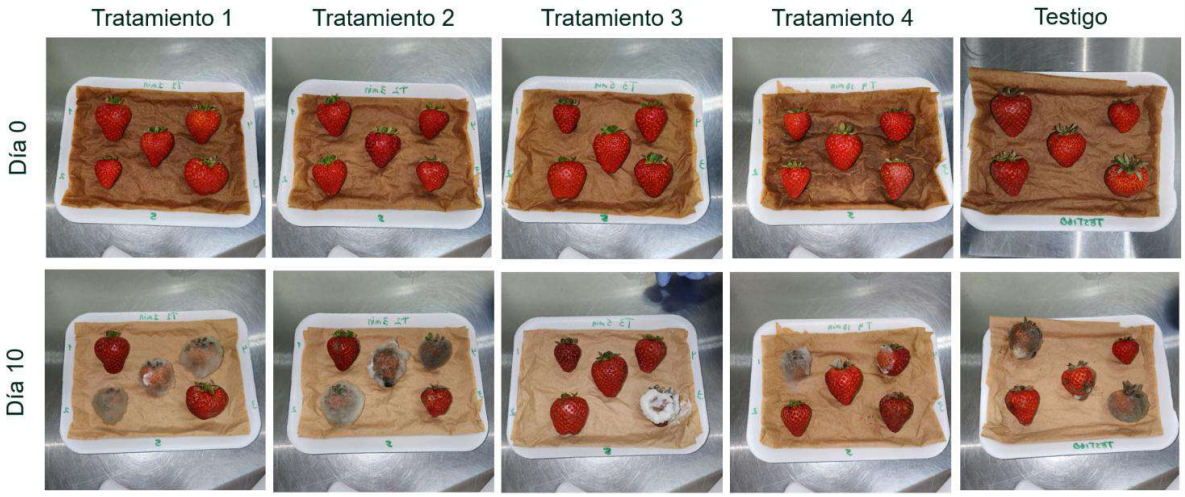
La severidad se estimó mediante una escala diagramática de daño propuesta por Gaitán y Mendez (2014), la cual clasifica el porcentaje de tejido afectado en diferentes categorías de infección. La severidad se expresó como porcentaje de tejido dañado por fruto, permitiendo comparar el avance de la enfermedad entre tratamientos. Se reportaron las variables Altura y Rendimiento de las plantas durante la fase de campo del experimento, con el objetivo de proporcionar una evaluación más precisa del estado fenotípico de los tratamientos aplicados.

Resultados y discusión

Como parte de la primera fase del estudio se evaluó el efecto de diferentes tiempos de inmersión en agua activada por plasma (AAP) sobre el desarrollo de *Botrytis cinerea* en frutos de fresa durante el almacenamiento poscosecha. Esta evaluación tuvo como finalidad identificar el tiempo de exposición más eficiente para su implementación en las etapas posteriores del proyecto, donde el tratamiento seleccionado será integrado con las estrategias de manejo evaluadas en campo.

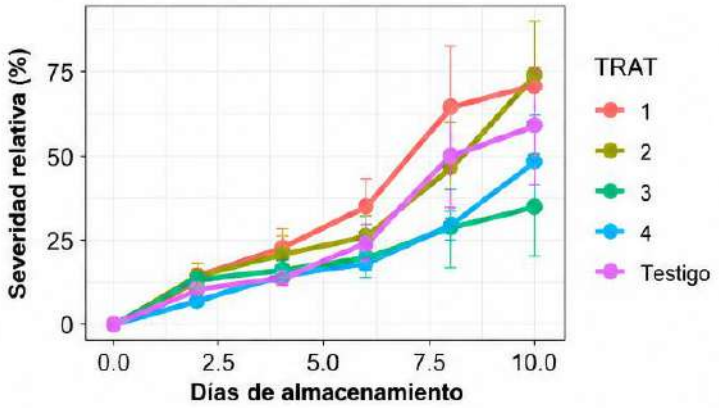
La evolución visual de la enfermedad mostró un incremento progresivo de los síntomas conforme avanzó el periodo de almacenamiento en todos los tratamientos; sin embargo, la velocidad de desarrollo del patógeno fue distinta dependiendo del tiempo de inmersión en AAP. Desde los primeros días de evaluación fue evidente una menor colonización del hongo en los frutos tratados con cinco minutos de exposición, mientras que el tratamiento testigo presentó un desarrollo acelerado del micelio y una mayor proporción de tejido afectado al finalizar el ensayo.

Figura 1. Secuencia fotográfica del desarrollo de *Botrytis cinerea* en frutos de fresa sometidos a los diferentes tiempos de inmersión en agua activada por plasma (día 0 y día 10).



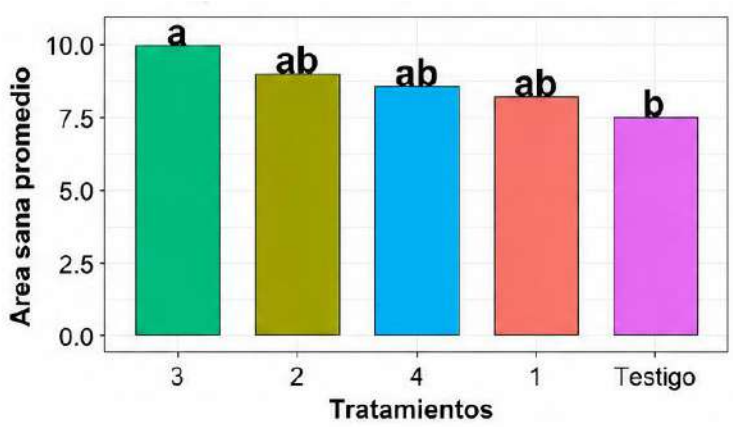
La cuantificación de la severidad confirmó las observaciones visuales (Figura 2). Independientemente del tratamiento, la severidad aumentó durante el almacenamiento como consecuencia del carácter progresivo de la infección causada por *B. cinerea*. No obstante, el tratamiento correspondiente a cinco minutos de inmersión presentó consistentemente los menores valores de severidad durante todo el periodo experimental, indicando un efecto protector del agua activada por plasma sobre el desarrollo del patógeno.

Figura 2. *Evolución de la severidad relativa de* Botrytis cinerea *durante el almacenamiento de frutos tratados con diferentes tiempos de inmersión en agua activada por plasma.*



Resultados similares fueron obtenidos al analizar el porcentaje de área sana del fruto (Figura 3). Los frutos tratados durante cinco minutos conservaron una mayor proporción de tejido sano respecto al resto de los tratamientos y al testigo, evidenciando una menor velocidad de deterioro durante el almacenamiento. Los datos fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA), el cual cumplió con los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas. El análisis mostró un efecto significativo del tiempo de evaluación ($p < 0.001$) y del tratamiento ($p = 0.0292$), mientras que la interacción entre ambos factores no fue significativa ($p = 0.9732$), lo que indica que la progresión del deterioro fue similar entre tratamientos. La comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$) mostró que el tratamiento de cinco minutos fue superior al testigo y presentó una tendencia favorable respecto a los demás tiempos de inmersión, confirmando que la duración de la exposición constituye un factor determinante en la eficacia del agua activada por plasma.

Figura 3. *Comparación del área sana de frutos de fresa sometidos a diferentes tiempos de inmersión en AAP*



El efecto observado puede atribuirse a la acción de las especies reactivas de oxígeno y nitrógeno generadas durante la activación del agua, las cuales inducen daño oxidativo sobre la membrana celular y otros componentes estructurales del hongo, limitando su crecimiento y capacidad de colonización. Lin et al., (2024) reportaron que el agua activada por plasma prolonga la vida útil de frutos de fresa al inhibir el crecimiento de microorganismos y reducir el deterioro poscosecha, resultados que coinciden con los obtenidos en el presente estudio.

Con base en estos resultados, el tratamiento de cinco minutos fue seleccionado como el tiempo de exposición más adecuado para las siguientes etapas de la investigación, en las cuales será evaluado en conjunto con las estrategias de manejo implementadas durante la fase de producción en campo.

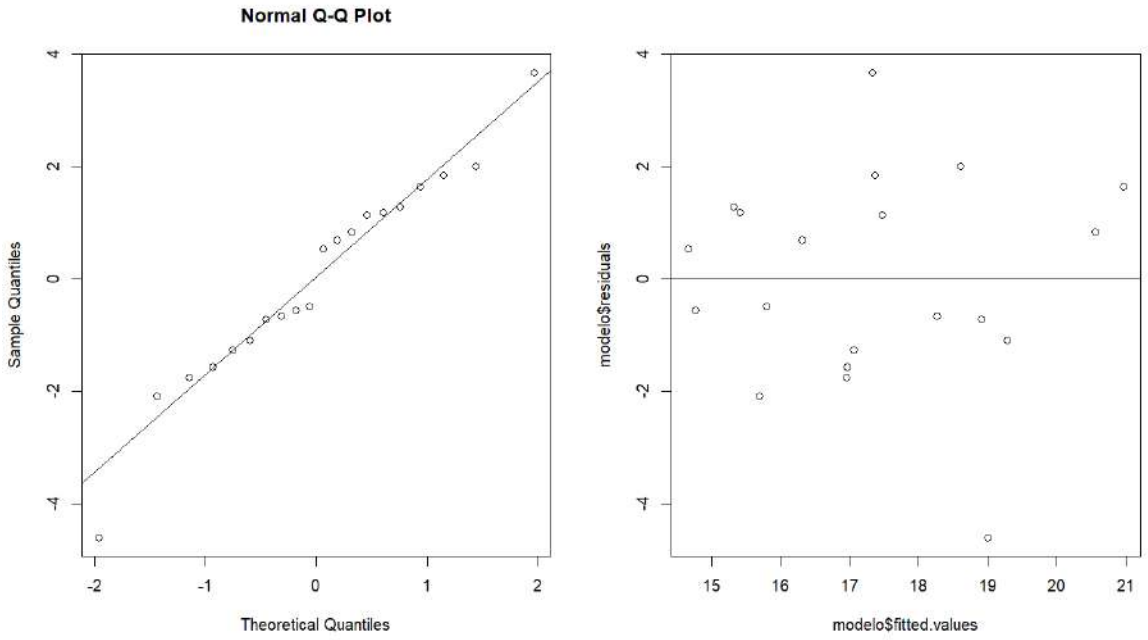
Desarrollo vegetativo de las plantas

Altura

Como parte del seguimiento del experimento establecido bajo condiciones de invernadero, se evaluó el desarrollo vegetativo de las plantas mediante la variable altura al finalizar el periodo de evaluación. Previamente al análisis estadístico se verificó el cumplimiento de los supuestos del modelo mediante pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas, y

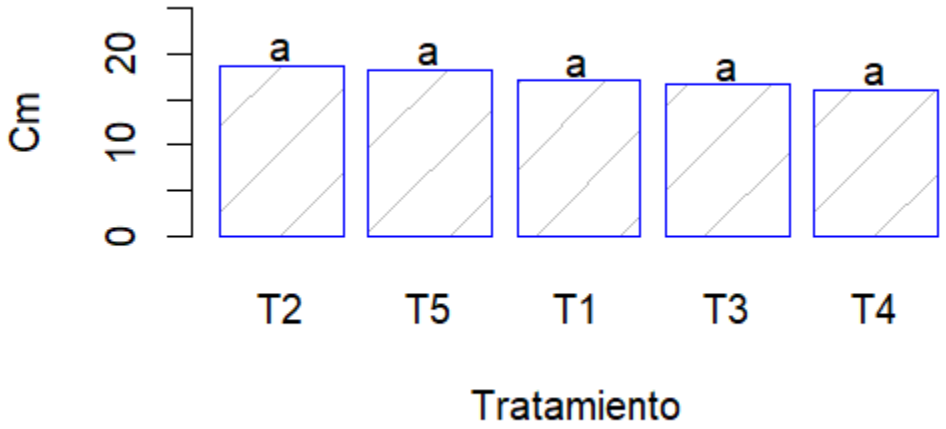
análisis de residuos. Los datos cumplieron con los supuestos del análisis de varianza, por lo que no fue necesario realizar transformaciones para su análisis.

Figura 4. Validación de los supuestos del modelo estadístico para la variable altura.



El análisis de varianza bajo un diseño de bloques completos al azar no mostró diferencias significativas entre tratamientos para la variable altura de planta (F = 0.954; p = 0.467). Asimismo, el efecto de los bloques no fue significativo (p = 0.097), lo que indica que las condiciones experimentales fueron relativamente homogéneas durante el desarrollo del ensayo. La comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) mostró que todos los tratamientos pertenecieron al mismo grupo estadístico. No obstante, se observaron diferencias numéricas entre las medias, donde el tratamiento T2 presentó la mayor altura promedio (18.7 cm), seguido por T5 (18.3 cm), T1 (17.0 cm), T3 (16.7 cm) y T4 (16.0 cm) (Figura 5).

Figura 5. Altura promedio de plantas de fresa bajo los diferentes tratamientos de manejo en campo



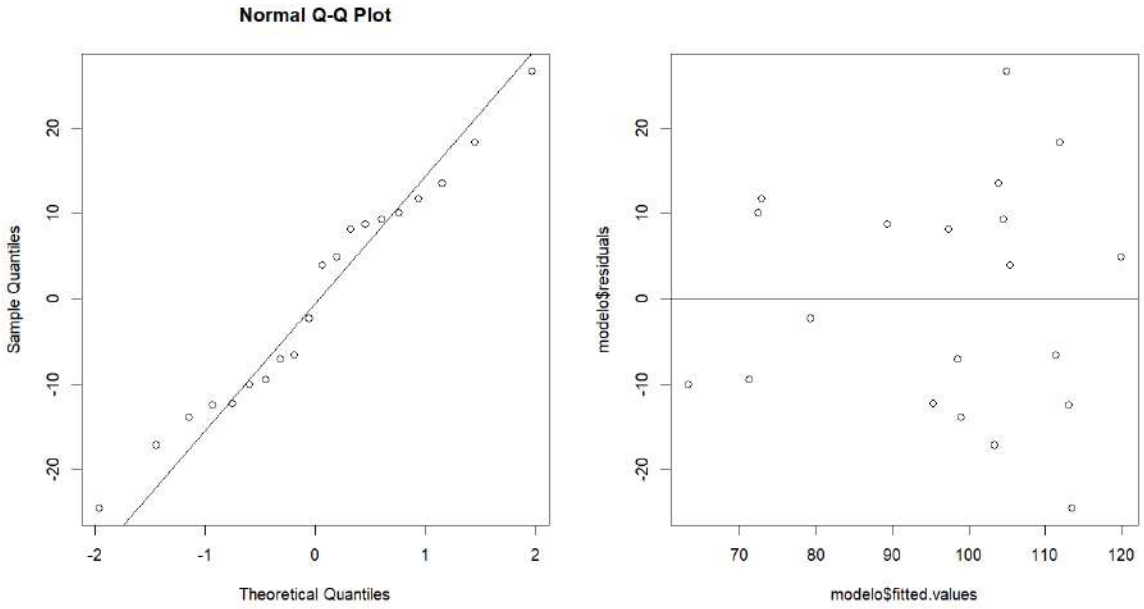
La ausencia de diferencias significativas en la altura de planta coincide con estudios que reportan que la respuesta de *Trichoderma* sobre el crecimiento vegetativo depende de diversos factores, entre ellos la especie o cepa utilizada, el genotipo del cultivo, las condiciones ambientales y el momento de evaluación (Lombardi et al., 2020). En diferentes cultivos se ha documentado que los efectos promotores del crecimiento no siempre se reflejan en incrementos de la altura de planta, sino que pueden manifestarse en variables fisiológicas, desarrollo radicular, absorción de nutrimentos o componentes del rendimiento, por lo que la evaluación conjunta de otras variables agronómicas resulta indispensable para interpretar la respuesta de las plantas al tratamiento.

Rendimiento de fruto

El rendimiento por planta fue evaluado al término del ciclo de producción utilizando el promedio de las unidades experimentales correspondientes a cada tratamiento. Previamente al análisis estadístico se verificó el cumplimiento de los supuestos del modelo mediante pruebas de normalidad, homogeneidad de varianzas y análisis de residuos. Los datos

presentaron una distribución normal y cumplieron los supuestos del análisis de varianza, por lo que no fue necesario realizar transformaciones.

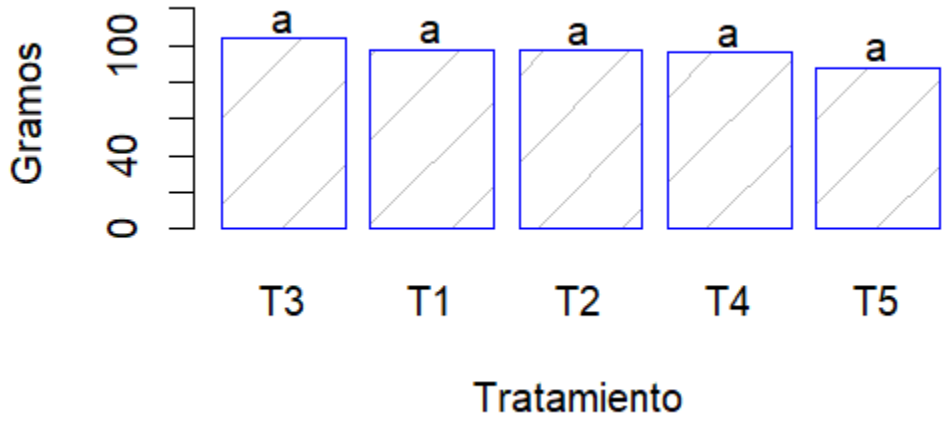
Figura 6. Validación de supuestos del modelo estadístico para la variable rendimiento



El análisis de varianza mostró que el efecto de los tratamientos sobre el rendimiento no fue significativo (F = 0.459; p = 0.765). En contraste, el efecto de los bloques resultó significativo (p = 0.014), lo que indica que el diseño de bloques completos al azar permitió controlar parte de la variabilidad presente en las condiciones del invernadero.

La comparación de medias mediante la prueba de Tukey (α = 0.05) indicó que todos los tratamientos pertenecieron al mismo grupo estadístico. No obstante, se observaron diferencias numéricas entre las medias, siendo el tratamiento T3 el que presentó el mayor rendimiento promedio (103.95 g planta^{-1}), seguido por T1 (97.56 g planta^{-1}), T2 (97.11 g planta^{-1}), T4 (95.92 g planta^{-1}) y T5 (87.92 g planta^{-1}) (Figura 7).

Figura 7. Rendimiento promedio por planta de fresa bajo los diferentes tratamientos de manejo en campo



Los resultados obtenidos muestran que, bajo las condiciones evaluadas, las aplicaciones de *Trichoderma spp.* no produjeron diferencias significativas en el rendimiento de fruto. Este comportamiento coincide con estudios que señalan que la respuesta productiva a la inoculación con especies de *Trichoderma* depende de factores como la cepa empleada, el cultivar, las condiciones ambientales y el manejo agronómico, por lo que los efectos sobre el rendimiento pueden ser variables entre experimentos.

Aunque las aplicaciones de *Trichoderma spp.* no produjeron diferencias significativas en altura y rendimiento bajo las condiciones evaluadas, esta etapa permitió obtener frutos desarrollados bajo diferentes estrategias de manejo biológico, los cuales constituyeron la base experimental para la evaluación poscosecha. La selección del tiempo óptimo de exposición al agua activada por plasma representa un paso previo para futuras investigaciones dirigidas a evaluar posibles efectos complementarios entre el manejo biológico en precosecha y las tecnologías no térmicas aplicadas en poscosecha.

Conclusión

Bajo las condiciones del presente estudio, las aplicaciones de *Trichoderma spp.* en precosecha no produjeron diferencias significativas en la altura de planta ni en el rendimiento de fresa; sin embargo, el tratamiento con cinco minutos de inmersión en agua activada por plasma fue el más eficaz para reducir la incidencia y severidad de *Botrytis cinerea* durante el almacenamiento poscosecha. En conjunto, estos resultados evidencian el potencial de integrar estrategias biológicas en precosecha con tecnologías no térmicas en poscosecha para el desarrollo de alternativas más sostenibles en el manejo de enfermedades de la fresa.

Literatura citada

Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera | Gobierno | gob.mx. (2025.). Retrieved July 26, 2026, from https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap

FAOSTAT. (2025.). Retrieved September 16, 2025, from https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL

Gaitán, J. B. M., Ferrucho, R. L., & Herrera, J. G. Á. (2014). Efecto de dos cepas de Trichoderma en el control de Botrytis cinerea y la calidad del fruto en fresa (Fragaria sp.). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, *8*(1), 44–56. https://doi.org/10.17584/rcch.2014v8i1.2799

Lin, X., Huang, S., Li, L., & Guo, J. (2024). Impact of plasma-activated water and cold plasma treatment on the firmness and antioxidant of postharvest fruits: a review. *Food Science and Biotechnology*, *34*(12), 2697–2706. https://doi.org/10.1007/S10068-024-01799-3

Lombardi, N., Caira, S., Troise, A. D., Scaloni, A., Vitaglione, P., Vinale, F., Marra, R., Salzano, A. M., Lorito, M., & Woo, S. L. (2020). Trichoderma Applications on Strawberry Plants Modulate the Physiological Processes Positively Affecting Fruit Production and Quality. *Frontiers in Microbiology*, *11*(July), 1–17. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.01364

Lopes, U. P., Zambolim, L., Costa, H., Pereira, O. L., & Finger, F. L. (2014). Potassium silicate and chitosan application for gray mold management in strawberry during storage. *Crop Protection*, *63*(September 2014), 103–106. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2014.05.013

Martínez-Cruz, N. del S., Arévalo-Niño, K., Verde-Star, M. J., Rivas-Morales, C., Oranday-

Cárdenas, A., Adriana Núñez-González, M., Morales-Rubio, M. E., Nieves, C. M. C. A., Socorro, D., & Cruz, M. (2011). Anthocyanins and anti free-radical activity of Rubus adenotrichus Schltdl (blackberry). *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, *42*(4), 66–71.

Momtaz, F., Hardy, G., & Bayliss, K. L. (2025). Fungal communities associated with postharvest strawberries in Western Australia. *Plant Pathology*, *74*(1), 210–219. https://doi.org/10.1111/ppa.14010

Weber, R. W. S., & Petridis, A. (2023). Fungicide Resistance in Botrytis spp. and Regional Strategies for Its Management in Northern European Strawberry Production. *BioTech*, *12*(4). https://doi.org/10.3390/biotech12040064

Yang, X., Zhang, C., Li, Q., & Cheng, J. (2023). *Physicochemical Properties of Plasma-Activated Water and Its*. Molecules 2023, 28, 2677. https://doi.org/10.3390/molecules28062677

Zheng, T., Lv, J., Sadeghnezhad, E., Cheng, J., & Jia, H. (2022). Transcriptomic and metabolomic profiling of strawberry during postharvest cooling and heat storage. *Frontiers in Plant Science*, *13*(October), 1–18. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1009747

Eficacia de aceites esenciales para el control de *Colletotrichum gloeosporioides* y la reducción de antracnosis postcosecha en mango

Petra Andrade-Hoyos[11]; Aarón Mendieta-Moctezuma[12]; Selma Ríos-Meléndez[2]; Eduardo Molina-Gayosso[13]

Resumen

La antracnosis, causada por *Colletotrichum* spp., constituye una de las principales limitantes poscosecha del mango debido a la aparición de lesiones oscuras y pudriciones que reducen la calidad comercial del fruto. En este trabajo se evaluó la actividad antifúngica de aceites esenciales (AE) de canela (*Cinnamomum zeylanicum*), orégano (*Origanum vulgare*), romero (*Salvia rosmarinus*) y pimienta negra (*Piper nigrum*) contra *C. gloeosporioides* MA-L4, con énfasis en su efecto sobre el crecimiento micelial y sobre frutos de mango Manila. Los AE se evaluaron in vitro a 500, 1000 y 2000 µL/L mediante la técnica de envenenamiento del medio, utilizando mancozeb como testigo químico. Posteriormente, frutos tratados por inmersión en emulsiones de los AE fueron inoculados artificialmente con una suspensión de 1×10^8 propágulos/mL y evaluados durante 15 días. *P. nigrum* inhibió completamente el crecimiento micelial en las tres concentraciones, mientras que *C. zeylanicum* alcanzó 100% de inhibición en 1000 y 2000 µL/L. *S. rosmarinus* presentó la menor actividad in vitro, con 56.7% de inhibición a 500 µL/L. En los frutos, todos los AE redujeron significativamente la severidad respecto al testigo; la mayoría de los tratamientos mantuvo los frutos en condición sana, y únicamente *S. rosmarinus* a 500 µL/L presentó trazas de enfermedad. Los resultados muestran que la eficacia observada sobre el fruto puede ser mayor que la predicha exclusivamente por el ensayo in vitro y respaldan el potencial de los AE, particularmente de *P. nigrum* y C. *zeylanicum*, como alternativas para el manejo poscosecha de la antracnosis del mango.

Palabras clave: *Mangifera indica*; antracnosis; *Colletotrichum gloeosporioides*; aceites esenciales; poscosecha; biocontrol.

[11] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Zacatepec, Carretera Zacatepec-Galeana s/n, Km 0.5, Colonia IMMS, Zacatepec 62780, Morelos, Mexico; petra.andrade.hoyos@gmail.com
[12] Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Instituto Politécnico Nacional, Carretera Estatal Santa Inés Tecuexcomac-Tepetitla, Km 1.5, Tepetitla de Lardizábal 90700, Tlaxcala, Mexico; sriosm@ipn.mx; amendietam@ipn.mx
[13] Universidad Politécnica de Puebla, Tercer Carril del Ejido, Serrano s/n, Cuanalá, 72640 Puebla, Pue. *eduardo.molina@uppuebla.edu.mx

Abstract

Anthracnose, caused by *Colletotrichum* spp., constitutes one of the main postharvest constraints of mango due to the appearance of dark lesions and rots that reduce the commercial quality of the fruit. In this study, the antifungal activity of essential oils (EOs) from cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum*), oregano (*Origanum vulgare*), rosemary (*Salvia rosmarinus*), and black pepper (*Piper nigrum*) was evaluated against *C. gloeosporioides* MA-L4, with emphasis on their effect on mycelial growth and on Manila mango fruit. The EOs were evaluated in vitro at 500, 1000, and 2000 µL/L using the poisoned food technique, with mancozeb as a chemical control. Subsequently, fruits treated by immersion in EO emulsions were artificially inoculated with a suspension of 1×10^8 propagules/mL and evaluated over 15 days. *P. nigrum* completely inhibited mycelial growth at all three concentrations, while *C. zeylanicum* achieved 100% inhibition at 1000 and 2000 µL/L. *S. rosmarinus* showed the lowest in vitro activity, with 56.7% inhibition at 500 µL/L. In fruit, all EOs significantly reduced severity relative to the control; most treatments kept fruits in a healthy condition, and only S. rosmarinus at 500 µL/L showed traces of disease. The results show that the efficacy observed on the fruit can be higher than that predicted exclusively by the in vitro assay and support the potential of EOs, particularly *P. nigrum* and *C. zeylanicum*, as alternatives for the postharvest management of mango anthracnose.

Keywords: Mangifera indica; anthracnose; *Colletotrichum gloeosporioides*; essential oils; postharvest; biocontrol.

Introducción

La antracnosis es una de las enfermedades de mayor importancia en mango, particularmente durante la etapa poscosecha. La infección por Colletotrichum puede permanecer quiescente durante el desarrollo del fruto y expresarse conforme avanza la maduración, cuando disminuyen mecanismos naturales de resistencia del exocarpio. En condiciones de almacenamiento y comercialización, la enfermedad se manifiesta principalmente como lesiones oscuras y hundidas, con una repercusión directa sobre la apariencia, la vida de anaquel y el valor comercial del producto.

El manejo convencional de la antracnosis depende en buena medida de fungicidas sintéticos; sin embargo, las restricciones asociadas con residuos, requisitos de los mercados de exportación y la selección de poblaciones menos sensibles a fungicidas justifican la búsqueda de alternativas. Los aceites esenciales constituyen una opción de interés debido a la presencia

de metabolitos secundarios con actividad antifúngica y a su potencial de aplicación como tratamientos o recubrimientos postcosecha.
El objetivo fue evaluar la eficacia de cuatro aceites esenciales, a tres concentraciones, sobre el crecimiento micelial de *C. gloeosporioides* MA-L4 y determinar su capacidad para reducir la severidad de la antracnosis en frutos de mango Manila bajo condiciones poscosecha.

Materiales y métodos

Material biológico

Se utilizó la cepa MA-L4 de *C. gloeosporioides*, previamente caracterizada molecularmente mediante secuenciación Sanger de la región ITS, utilizando los iniciadores ITS1/ITS4 (GenBank OR466677.1). La cepa se encuentra conservada en el Centro de Agroecología-ICUAP de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Aceites esenciales

Los aceites esenciales de *C. zeylanicum*, *O. vulgare* y *S. rosmarinus* se obtuvieron a partir de hojas deshidratadas, mientras que el de P. nigrum se obtuvo de fruto seco. Se procesaron 20 kg de material vegetal de cada especie mediante destilación por arrastre de vapor durante 3 h. Los aceites se deshidrataron con sulfato de sodio anhidro y se conservaron en frascos ámbar a 4 °C. La composición volátil fue determinada por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas.

Evaluación antifúngica in vitro

Se empleó la técnica de envenenamiento del medio con PDA suplementado con los AE a 500, 1000 y 2000 µL/L. Se agregó Tween 20 al 1% como emulsionante. Mancozeb (1000 µL/L) se utilizó como testigo químico y agua destilada como testigo negativo. En el centro de cada placa se colocó un disco de PDA de 5 mm con micelio de *C. gloeosporioides* de 10 días. Las placas se sellaron con Parafilm® y se incubaron en oscuridad a 28 ± 2 °C durante 15 días, con cuatro repeticiones por tratamiento. La inhibición del crecimiento micelial (RGI) se calculó con base en el diámetro de crecimiento del testigo y del tratamiento. La sensibilidad se clasificó como baja (<40%), intermedia (40–75%) o sensible (>75%).

Evaluación sobre frutos de mango

Se utilizaron frutos maduros de mango Manila sin síntomas visibles. Los frutos se lavaron y desinfectaron superficialmente mediante inmersión en hipoclorito de sodio al 1% durante 3 min, seguido de dos enjuagues con agua destilada estéril. Las emulsiones se prepararon con 20 mL de agua destilada estéril, jabón potásico Castalia Bio® (2.5 mL/L), Tween 20 (1

mL/L) y AE a 500, 1000 o 2000 µL/L. Cada fruto se sumergió durante 5 min y se dejó secar 1 h a temperatura ambiente. Posteriormente se realizaron heridas de aproximadamente 2 mm de profundidad y se inocularon con 20 µL de una suspensión de 1×10^8 propágulos/mL de *C. gloeosporioides*. Los frutos se incubaron en cámaras húmedas a 25 ± 2 °C durante 15 días. La severidad se determinó con una escala de 0 a 4: 0 = fruto sano; 1 = trazas (≤25% de superficie afectada); 2 = daño ligero (26–50%); 3 = daño moderado (51–75%); y 4 = daño severo (>75%).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron en R Studio. Se verificó la normalidad mediante Shapiro–Wilk y, para los datos con distribución normal, se realizó ANOVA de dos vías. Las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con $p < 0.05$.

Resultados y discusión

Actividad antifúngica contra *C. gloeosporioides*

La respuesta del patógeno dependió tanto del tipo de aceite como de la concentración aplicada. En términos generales se observó una relación dosis–respuesta, aunque la magnitud de la respuesta fue claramente diferente entre especies. *P. nigrum* fue el tratamiento más consistente: produjo inhibición completa (100%) del crecimiento micelial en las tres concentraciones evaluadas. *C. zeylanicum* también mostró una elevada actividad, alcanzando 100% de inhibición en 1000 y 2000 µL/L. Por el contrario, S. *rosmarinus* presentó la menor actividad in vitro; a 500 µL/L registró 56.7% de inhibición, estadísticamente comparable con el testigo químico en esa condición.

La elevada actividad de *P. nigrum* y *C. zeylanicum* coincide con la composición química observada (Leesutthiphonchai, et al., 2024). Ambos aceites presentaron una elevada proporción de compuestos aromáticos, particularmente metileugenol y eugenol en *P. nigrum* y eugenol en *C. zeylanicum* (cuadro 1). Estos compuestos pueden contribuir a la alteración de estructuras celulares y membranas fúngicas. No obstante, los resultados no permiten atribuir el efecto a un solo metabolito: la actividad de un AE depende de la concentración de sus componentes y de las interacciones entre compuestos mayoritarios y minoritarios.

Cuadro 1. Principales componentes en los aceites esenciales extraídos mediante destilación por arrastre de vapor y cuantificados por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas.

Aceite esencial	Principales componentes destacados	Contenido (%)

C. zeylanicum	Eugenol; alcohol bencílico; cinamaldehído	61.88; 14.44; 2.97
P. nigrum	Metileugenol; eugenol; β-mirceno	46.28; 32.93; 9.54
S. rosmarinus	Eucaliptol; α-pineno; verbenona	32.42; 30.78; 7.04
O. vulgare	Sabineno hidratado; carvacrol; γ-terpineno	21.68; 6.75; 4.61

Un resultado particularmente importante es que la abundancia de α-pineno en *S. rosmarinus* (30.78%) no se tradujo en la mayor actividad antifúngica (Bilal, et al., 2023). Esto indica que la composición química por sí sola no predice necesariamente la respuesta del patógeno y refuerza la necesidad de evaluar cada combinación de especie vegetal, quimiotipo, concentración y patógeno. La menor sensibilidad de *S. rosmarinus* frente a *C. gloeosporioides* MA-L4 también contrasta con trabajos donde aceites de esta especie mostraron elevada actividad contra otras especies de *Colletotrichum*, lo que sugiere una respuesta dependiente de la especie o aislado del patógeno.

Cuadro 2. Inhibición de *C. gloeosporioides* en ensayo in vitro (medio envenenado) por 4 extractos vegetales.

Aceite	500 µL/L	1000 µL/L	2000 µL/L	Interpretación principal
P. nigrum	100% inhibición	100% inhibición	100% inhibición	Mayor y más consistente actividad in vitro
C. zeylanicum	Alta inhibición	100% inhibición	100% inhibición	Actividad elevada; respuesta dependiente de dosis
O. vulgare	Actividad intermedia–alta	Mayor inhibición	Mayor inhibición	Respuesta dosis–dependiente
S. rosmarinus	56.7% inhibición	Mayor inhibición	Mayor inhibición	Menor eficacia in vitro; sensibilidad variable

Eficacia sobre frutos de mango

El ensayo sobre frutos mostró un resultado de gran interés para el enfoque poscosecha. Todos los aceites esenciales redujeron significativamente la severidad de la enfermedad respecto al testigo absoluto. En la evaluación visual, los tratamientos mantuvieron los frutos sanos, con excepción de S. rosmarinus a 500 µL/L, donde se observaron únicamente trazas de enfermedad. El testigo sin AE presentó el daño más evidente.

La respuesta sobre fruto no reprodujo exactamente el orden observado in vitro. Aunque *P. nigrum* fue el aceite con mayor inhibición micelial in vitro, las diferencias entre aceites sobre fruto fueron más estrechas. De hecho, *S. rosmarinus* mostró mejor desempeño in vivo que in

vitro, con una diferencia de hasta 27.24 puntos porcentuales de inhibición en su menor concentración. En contraste, *C. zeylanicum* presentó los valores de severidad más altos entre los aceites evaluados, a pesar de su fuerte actividad in vitro.

Este desacoplamiento entre los ensayos es relevante desde el punto de vista fitopatológico. El crecimiento de un hongo en PDA representa una interacción simplificada, mientras que en el fruto intervienen la superficie cuticular, la disponibilidad de nutrientes, la humedad, los mecanismos constitutivos y postinfecciosos del fruto, la volatilidad y distribución del aceite y las propiedades de la formulación utilizada. Por ello, un aceite con actividad moderada in vitro puede comportarse favorablemente como tratamiento poscosecha.

En conjunto, los resultados del fruto son particularmente relevantes porque muestran que los cuatro AE evaluados tuvieron efecto protector bajo las condiciones experimentales. En condiciones *in vivo*, todos los AE redujeron el desarrollo del patógeno en más de 90%, incluso *S. rosmarinus*, que presentó menor actividad in vitro. Esto fortalece la hipótesis de que la evaluación sobre fruto debe ser un componente central en la selección de candidatos para manejo poscosecha (cuadro 3).

Cuadro 3. Inhibición de *C. gloeosporioides* en ensayo postcosecha de frutos de mango por 4 extractos vegetales.

Tratamiento	Respuesta sobre fruto	Observación destacada
P. nigrum	Reducción marcada de severidad	Consistente con su elevada actividad in vitro
C. zeylanicum	Reducción significativa de severidad	Presentó las mayores severidades relativas entre los AE evaluados
O. vulgare	Reducción significativa de severidad	Los tratamientos mantuvieron baja expresión de enfermedad
S. rosmarinus	Reducción significativa de severidad	A 500 µL/L se observaron sólo trazas; mejor desempeño in vivo que in vitro
Testigo	Mayor severidad	Lesiones oscuras y hundidas; referencia para evaluar eficacia

Implicaciones para el manejo poscosecha

Desde una perspectiva de manejo integrado, los resultados permiten separar dos criterios de selección. *P. nigrum* y *C. zeylanicum* destacan como candidatos por su fuerte efecto directo sobre el crecimiento micelial, mientras que los cuatro aceites muestran interés como tratamientos protectores del fruto. La selección final para una tecnología poscosecha no debería basarse únicamente en el porcentaje de inhibición en PDA; también deben

considerarse la eficacia sobre fruto, estabilidad de la formulación, fitotoxicidad, efecto sobre calidad sensorial, persistencia, costo y compatibilidad con otros tratamientos.

El siguiente paso lógico es optimizar la formulación y determinar la concentración mínima eficaz en fruto, además de evaluar la calidad poscosecha y la vida de anaquel. También sería pertinente comparar los mejores aceites con un tratamiento comercial de referencia bajo condiciones de almacenamiento y evaluar diferentes aislados de Colletotrichum para determinar la estabilidad de la respuesta.

Conclusiones

Los cuatro aceites esenciales mostraron actividad antifúngica contra *C. gloeosporioides* MA-L4, pero con diferencias claras entre especies y concentraciones.

P. nigrum fue el aceite más activo in vitro, con 100% de inhibición del crecimiento micelial en las tres concentraciones evaluadas.

C. zeylanicum alcanzó 100% de inhibición a 1000 y 2000 µL/L, mientras que S. rosmarinus presentó la menor actividad inicial, con 56.7% de inhibición a 500 µL/L.

En frutos de mango Manila, todos los aceites redujeron significativamente la severidad de la antracnosis respecto al testigo; la mayoría de los tratamientos mantuvo los frutos sanos y *S. rosmarinus* a 500 µL/L sólo produjo trazas de enfermedad.

La respuesta in vivo no fue un reflejo directo de la actividad in vitro, lo que demuestra la importancia de validar los candidatos directamente sobre el fruto y bajo condiciones poscosecha.

P. nigrum y *C. zeylanicum* se identifican como candidatos prioritarios para estudios posteriores de formulación y optimización, sin descartar *O. vulgare* y *S. rosmarinus* debido a su efecto favorable sobre frutos.

Literatura citada

Almasaudi, N.M.; Al-Qurashi, A.D.; Elsayed, M.I.; Abo-Elyousr, K.A. 2022. Essential oils of oregano and cinnamon as an alternative method for control of gray mold disease of table grapes caused by Botrytis cinerea. Journal of Plant Pathology 104: 317–328.

Bilal, H.; Hashmi, M.S. 2023. Combination of rosemary oil and potassium sorbate controls anthracnose in mango fruit by triggering defense-related enzymes. Physiological and Molecular Plant Pathology 127: 102112.

Choudhary, H.; Dhar, V.; Dave, P.; Pareek, S. 2025. Postharvest anthracnose disease in mango (Mangifera indica L.) fruit: Sustainable alternatives for the control. Crop Science 65: e70064.

Corkidi, G.; Balderas-Ruíz, K.A.; Taboada, B.; Serrano-Carreón, L.; Galindo, E. 2006. Assessing mango anthracnose using a new three-dimensional image-analysis technique to quantify lesions on fruit. Plant Pathology 55: 250–257.

Danh, L.T.; Giao, B.T.; Duong, C.T.; Nga, N.T.T.; Tien, D.T.K.; Tuan, N.T.; Huong, B.T.C.; Nhan, T.C.; Trang, D.T.X. 2021. Use of essential oils for the control of anthracnose disease caused by Colletotrichum acutatum on post-harvest mangoes of Cat Hoa Loc variety. Membranes 11: 719.

Dofuor, A.K.; Quartey, N.K.-A.; Osabutey, A.F.; et al. 2023. Mango anthracnose disease: The current situation and direction for future research. Frontiers in Microbiology 14: 1168203.

de Oliveira, T.S.; Costa, A.M.M.; Cabral, L.M.C.; et al. 2023. Anthracnose controlled by essential oils: Are nanoemulsion-based films and coatings a viable and efficient technology for tropical fruit preservation? Foods 12: 279.

Huang, X.; Liu, T.; Zhou, C.; Huang, Y.; Liu, X.; Yuan, H. 2021. Antifungal activity of essential oils from three Artemisia species against Colletotrichum gloeosporioides of mango. Antibiotics 10: 1331.

Kamle, M.; Kumar, P. 2016. Colletotrichum gloeosporioides: Pathogen of anthracnose disease in mango (Mangifera indica L.). In: Current Trends in Plant Disease Diagnostics and Management Practices. Springer, Cham, pp. 207–219.

Kumar, A.; Kudachikar, V.B. 2018. Antifungal properties of essential oils against anthracnose disease: A critical appraisal. Journal of Plant Diseases and Protection 125: 133–144.

Leesutthiphonchai, W.; Piasai, O.; Vajrodaya, S.; et al. 2024. Evaluation of efficacy of four Cinnamomum species extracts and cinnamaldehyde to control anthracnose of mango fruit. European Journal of Plant Pathology 170: 263–279.

Maqbool, M.; Ali, A.; Alderson, P.G.; Mohamed, M.T.M.; Siddiqui, Y.; Zahid, N. 2011. Postharvest application of gum arabic and essential oils for controlling anthracnose and quality of banana and papaya during cold storage. Postharvest Biology and Technology 62: 71–76.

Nazzaro, F.; Fratianni, F.; Coppola, R.; de Feo, V. 2017. Essential oils and antifungal activity. Pharmaceuticals 10: 86.

Peralta-Ruiz, Y.; Rossi, C.; Grande-Tovar, C.D.; Chaves-López, C. 2023. Green management of postharvest anthracnose caused by Colletotrichum gloeosporioides. Journal of Fungi 9: 623.

Perumal, A.B.; Sellamuthu, P.S.; Nambiar, R.B.; Sadiku, E.R. 2017. Effects of essential oil vapour treatment on the postharvest disease control and different defence responses in two mango (Mangifera indica L.) cultivars. Food and Bioprocess Technology 10: 1131–1141.

Tan, Y.; Nie, Y.; Yuan, X.; Yang, H.; Pan, Y.; Zhang, Z. 2024. Black pepper essential oil nanoemulsion inhibits Colletotrichum gloeosporioides by regulating respiratory metabolism. Food Science and Technology 34: 687–697.

Vilela, E.S.D.; Terao, D.; do Nascimento de Queiroz, S.C.; et al. 2024. Essential oils on the control of fungi causing postharvest diseases in mango. Brazilian Journal of Microbiology 55: 689–698.

Ziedan, E.S.H.E.S. 2024. Essential oils as green fungicides for controlling postharvest diseases on banana fruits: A review. Analele Universității din Oradea, Fascicula Biologie 31: 121–137.

Eficacia de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio para el manejo de *Tillandsia* spp. en cítricos (*Citrus* spp.) en Perú

Agustina Valverde Rodríguez[14], Fiorela Villaflor Garay[15], Dalila Illatopa Espinoza[16]; Miltao Edelio Campos Albornoz[17]

Resumen

La proliferación de especies de *Tillandsia* spp. constituye un problema fitosanitario emergente en sistemas frutícolas del Perú debido a su elevada capacidad de colonización sobre árboles hospedantes, afectando el crecimiento vegetativo, la interceptación de la radiación solar y el manejo agronómico del cultivo. El objetivo de esta investigación fue evaluar la eficacia de diferentes dosis de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio para el manejo de *Tillandsia* spp. en cítricos (*Citrus* spp.) bajo las condiciones agroecológicas del banco de germoplasma del Centro de Investigación Canchán, Huánuco, Perú. El experimento se estableció bajo un Diseño Completamente al Azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones. Se evaluaron el peso de las epífitas, la pérdida de humedad y el porcentaje de mortalidad como indicadores de eficacia del tratamiento. Los resultados mostraron diferencias significativas entre tratamientos ($p<0,05$). La combinación de sulfato de cobre (15 g L^{-1}) y bicarbonato de sodio (86 g L^{-1}) presentó la mayor eficacia, reduciendo el peso de las epífitas hasta 1,39 g, incrementando la pérdida de humedad hasta 80,80 % y alcanzando una mortalidad de 70,74 %. Estos resultados evidencian que la aplicación conjunta de ambos compuestos constituye una alternativa eficaz para el manejo de *Tillandsia* spp. en cítricos, representando una opción de menor impacto ambiental y potencial aplicación en programas de manejo integrado de esta epífita invasora.

Palabras clave: control químico, epífitas invasoras, manejo integrado, sulfato de cobre, bicarbonato de sodio.

[14] Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional Hermilio Valdizan, Perú. avalverde@unheval.edu.pe
[15] Universidad Nacional Hermilio Valdizan, Perú. villaflor@unheval.edu.pe
[16] Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional Hermilio Valdizan, Perú. dillatopa@unheval.edu.pe
[17] Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Perú. mcamposa@undad.edu.pe

Abstract

The proliferation of *Tillandsia* spp. has become an emerging phytosanitary problem in Peruvian fruit production systems due to its high colonization capacity on host trees, negatively affecting vegetative growth, light interception, and orchard management. This study evaluated the efficacy of different rates of copper sulfate and sodium bicarbonate for the management of *Tillandsia* spp. on citrus (*Citrus* spp.) under the agroecological conditions of the Canchán Research Center germplasm bank, Huánuco, Peru. The experiment was established using a completely randomized design with four treatments and three replicates. Epiphyte fresh weight, moisture loss, and mortality percentage were assessed as indicators of treatment efficacy. Significant differences among treatments were detected ($p<0.05$). The combination of copper sulfate at 15 g L^{-1} and sodium bicarbonate at 86 g L^{-1} showed the highest efficacy, reducing epiphyte weight to 1.39 g, increasing moisture loss to 80.80%, and achieving 70.74% mortality. These findings demonstrate that the combined application of copper sulfate and sodium bicarbonate is an effective alternative for managing *Tillandsia* spp. in citrus orchards, providing a practical, environmentally compatible option that could be incorporated into integrated management programs for invasive epiphytic plants

Keywords: chemical control, copper sulfate, citrus, invasive epiphytes, sodium bicarbonate.

Introducción

Las plantas epífitas representan aproximadamente el 9–10 % de la flora vascular mundial y desempeñan funciones ecológicas fundamentales en los ecosistemas tropicales y subtropicales, al participar en la captura de agua atmosférica, el reciclaje de nutrientes y la provisión de hábitats para numerosos organismos (Zotz, 2016). Dentro de este grupo, la familia Bromeliaceae constituye uno de los linajes más exitosos de epífitas vasculares, con más de 3 700 especies distribuidas principalmente en el continente americano, donde ocupan una amplia diversidad de condiciones ambientales, desde bosques húmedos hasta ecosistemas semiáridos (Benzing, 2000; Givnish et al., 2014).

El género *Tillandsia* comprende más de 650 especies distribuidas desde el sur de los Estados Unidos hasta Argentina y Chile, siendo considerado el género más diverso de Bromeliaceae (Gouda et al., 2025). La mayoría de sus especies presentan un hábito

epífito y obtienen el agua y los nutrientes directamente de la atmósfera mediante tricomas foliares altamente especializados, característica que les permite colonizar eficientemente ramas, troncos, cercas vivas y otras superficies sin establecer conexiones vasculares con el hospedero (Benzing, 2000; Zotz, 2016). Esta estrategia fisiológica reduce su dependencia del suelo y favorece una elevada capacidad de dispersión, particularmente en ambientes abiertos donde el viento constituye el principal agente de transporte de sus semillas plumosas (García-García et al.,2025).

Entre las especies de mayor importancia ecológica y agrícola destaca *Tillandsia recurvata* (L.) cuya extraordinaria plasticidad ecológica le permite colonizar una gran diversidad de árboles nativos, ornamentales, forestales y frutales (Flores-Palacios et al., 2015). Su establecimiento se ve favorecido por condiciones de alta luminosidad, periodos prolongados de sequía, escasa precipitación y la disminución de la cobertura arbórea, factores que incrementan la disponibilidad de sitios adecuados para la germinación y el desarrollo de nuevas colonias (Zotz, 2016; Flores-Palacios & García-Franco, 2006).

Estudios experimentales recientes como los de García-García et al. (2025) demostraron que *T. recurvata* puede afectar el desempeño fisiológico del árbol hospedante tanto por efectos directos, relacionados con el sombreado y la interceptación de la radiación fotosintéticamente activa, como por efectos indirectos derivados de cambios en el microclima de la copa (Ortega et al., 2026).) demostró una correlación directa y significativa entre la infestación por *Tillandsia recurvata* y una mayor muerte de flores, lo que reduce el éxito reproductivo del árbol hospedador bloqueando la luz solar y limitando la capacidad fotosintética del hospedero, además de obstruir las estomas de las ramas, lo que dificulta su respiración y debilita de forma progresiva la salud forestal (Alcocer, y Ramales, 2026).

Desde el punto de vista agrícola, la proliferación de *Tillandsia* spp. constituye un problema fitosanitario emergente debido a que las plantas forman agregaciones densas sobre ramas y estructuras reproductivas (Benzing, 2000; Zotz, 2016). En frutales perennes, las infestaciones prolongadas también incrementan el riesgo de quiebre de ramas por sobrecarga mecánica y disminuyen el valor comercial de las plantaciones cuando alcanzan niveles elevados de colonización (Flores-Palacios, 2016; Flores-Palacios & García-Franco, 2006; Zotz, 2016). En árboles adultos, las infestaciones severas de *Tillandsia* spp. incrementan el sombreado interno, reducen la eficiencia de la intercepción lumínica, dificultan las labores de poda, cosecha y monitoreo fitosanitario, además de favorecer la acumulación de biomasa seca que incrementa el

riesgo de quiebre de ramas y disminuye la calidad fisiológica del árbol (Benzing, 2000; Zotz, 2016).

Como alternativa al control mecánico, diferentes investigaciones han evaluado el uso de compuestos químicos capaces de inducir la desecación y muerte de los tejidos de *Tillandsia* spp. Entre ellos, el sulfato de cobre ha despertado especial interés debido a su amplia utilización como fungicida y bactericida en agricultura. Su mecanismo de acción se basa en la liberación de iones cúpricos (Cu^{2+}), los cuales alteran la permeabilidad de las membranas celulares, inhiben la actividad enzimática y generan estrés oxidativo mediante la formación de especies reactivas de oxígeno, provocando finalmente la muerte celular (Lamichhane et al., 2018).

No obstante, el uso continuo de formulaciones cúpricas también ha generado preocupación debido a la acumulación progresiva de cobre en el suelo y sus posibles efectos negativos sobre microorganismos benéficos, lombrices y otros componentes de la biota edáfica (Lamichhane et al., 2018). En consecuencia, las investigaciones recientes recomiendan optimizar las dosis de aplicación y evaluar estrategias que permitan reducir la cantidad total de cobre utilizada, manteniendo simultáneamente niveles adecuados de eficacia biológica.

Otra alternativa de creciente interés corresponde al bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$), compuesto ampliamente utilizado en agricultura por su baja toxicidad, bajo costo y reducido impacto ambiental. Aunque su empleo se ha concentrado principalmente en el manejo de enfermedades causadas por hongos fitopatógenos, existen algunos estudios que han demostrado su funcionalidad contra la *Tillandsia* sp. (Alvarado-Rosales y Lourdes Saavedra-Romero, 2024; Reséndiz-Vega et al., 2024; Gómez-Ramírez et al., 2023). que las soluciones concentradas de bicarbonato modifican el pH superficial de los tejidos vegetales, alteran la presión osmótica y favorecen procesos de deshidratación celular, condiciones que limitan la supervivencia de diferentes organismos vegetales y microorganismos (Reséndiz-Vega y Sánchez-Trujillo, 2021; Palmer et al., 1997; Horst et al., 1992).

Con base en los antecedentes expuestos, se identifica un vacío de conocimiento relacionado con la escasa información científica sobre la eficacia de diferentes concentraciones de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio para el manejo de *Tillandsia* spp. en cítricos cultivados bajo condiciones agroecológicas del Perú. La generación de esta evidencia resulta indispensable para establecer protocolos técnicamente sustentados que puedan incorporarse a programas de manejo integrado

de esta epífita invasora.

En este contexto, la hipótesis de la presente investigación plantea que la aplicación de sulfato de cobre combinado con bicarbonato de sodio incrementa significativamente la mortalidad y la pérdida de humedad de *Tillandsia* spp., reduciendo su biomasa respecto al tratamiento testigo. En consecuencia, el objetivo del estudio fue evaluar la eficacia de diferentes dosis de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio para el manejo de *Tillandsia* spp. en cítricos (*Citrus* spp.) en las condiciones agroecológicas del Centro de Investigación Canchán, Huánuco, Perú.

Materiales y métodos

Área de estudio

La investigación se realizó en el Banco de Germoplasma del Centro de Investigación Canchán de la Universidad Nacional Hermilio Valdizán, ubicado a 7 km de la ciudad de Huánuco, Perú, en la margen izquierda del río Higueras (09°31′35″ S; 76°30′00″ O; 2020 m s.n.m.). Durante el período experimental, la temperatura osciló entre 14.1 y 26.8 °C, con una humedad relativa promedio de 68.2 % y una precipitación acumulada de 262.4 mm, condiciones correspondientes a la zona de vida Estepa Espinosa–Montano Tropical (ee-MBT), según los registros de la estación meteorológica del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

Material vegetal y condiciones experimentales

El experimento se desarrolló en una colección de 89 árboles de cítricos (*Citrus* spp.) con aproximadamente 25 años, establecidos con un marco de plantación de 4.65 × 6.20 m y con infestación natural de *Tillandsia recurvata* (L.) L. Antes de la aplicación de los tratamientos se realizó una evaluación fitosanitaria para determinar el nivel de infestación mediante una escala descriptiva adaptada de Hawksworth (1977), clasificando los árboles según el porcentaje de ramas infestadas. Los resultados de las evaluaciones para los grados de infestación inicial determinaron que el 99% de los árboles en la parcela experimental estuvieron infestados de plantas epifitas, posicionándose en el grado 4 (árbol altamente infestado) y el 1 % restante se sitúa en el grado 2 (primer tercio infestado y el segundo tercio del árbol con infestación ligera). Posteriormente, se efectuó el desmalezado del área experimental, la remoción mecánica de las epífitas de mayor tamaño y la poda sanitaria de ramas severamente afectadas con el propósito de uniformizar las condiciones iniciales del ensayo.

Reactivos evaluados

Se evaluó la eficacia de mezclas de sulfato de cobre pentahidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$) y bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$) aplicadas mediante pulverización foliar. Las concentraciones utilizadas correspondieron a las establecidas en el diseño experimental de la investigación.

Diseño experimental

Se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) conformado por cuatro tratamientos (un testigo y tres dosis de sulfato de cobre + bicarbonato de sodio) con tres repeticiones, totalizando doce unidades experimentales. La unidad experimental estuvo constituida por tres árboles seleccionados aleatoriamente dentro de cada tratamiento. Para las evaluaciones, cada árbol fue dividido en tres estratos (inferior, medio y superior), de los cuales se recolectaron diez muestras de epífitas por estrato, obteniéndose treinta observaciones por árbol.

Los tratamientos evaluados fueron los siguientes:

Tratamiento	Sulfato de cobre (g L^{-1})	Bicarbonato de sodio (g L^{-1})
T0 (Testigo)	0.00	0.00
T1	10.00	43.00
T2	12.47	64.47
T3	15.00	86.00

Aplicación de los tratamientos

Las aplicaciones se realizaron mediante pulverización utilizando pulverizadora estacionaria. Para la preparación de las soluciones, el sulfato de cobre y el bicarbonato de sodio se disolvieron inicialmente por separado y posteriormente se mezclaron antes de ser incorporados al tanque del equipo de aplicación. Cada árbol recibió aproximadamente tres minutos de pulverización hasta alcanzar un cubrimiento uniforme de la copa infestada. Se efectuaron tres aplicaciones con un intervalo de siete días y condesando de 21 días, para retomar las aplicaciones. siendo en total tres momentos de aplicación.

Variables evaluadas

Peso fresco de *Tillandsia* spp.

Después de cada evaluación, las epífitas recolectadas fueron identificadas por tratamiento y repetición, transportadas al laboratorio y pesadas individualmente en una balanza analítica. Los resultados fueron registrados en gramos (g), utilizando el peso fresco como indicador de la respuesta al tratamiento.

Pérdida de humedad

La pérdida de humedad se estimó a partir de la diferencia entre el peso promedio de las epífitas del tratamiento testigo (peso verde) y el peso de las epífitas tratadas.

Mortalidad de *Tillandsia* spp.

La mortalidad se determinó mediante una escala visual, considerando cambios en la coloración y textura de las epífitas. En cada estrato del árbol se evaluaron diez individuos, totalizando treinta observaciones por árbol. La escala comprendió cinco categorías: grado 0 (sin daño), grado 1 (daño ligero), grado 2 (daño severo), grado 3 (muerte sin desprendimiento) y grado 4 (muerte con desprendimiento).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron organizados en hojas de cálculo de Microsoft Excel y posteriormente analizados mediante el software InfoStat. Para cada variable se realizó un análisis de varianza (ANOVA) correspondiente al Diseño Completamente al Azar. Cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$), las medias fueron comparadas mediante la prueba de Duncan al 5 % de probabilidad de error. Asimismo, se calcularon el coeficiente de variación (CV) y el error estándar (EE) como indicadores de la precisión experimental.

Resultados y discusión

Efecto de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio sobre el peso de *Tillandsia* spp.

El análisis estadístico evidenció un efecto altamente significativo de los tratamientos sobre el peso fresco de *Tillandsia* spp. ($p < 0.05$), lo que demuestra que la combinación de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio modificó significativamente la respuesta de la epífita respecto al tratamiento testigo. La comparación de medias mediante la prueba de Duncan mostró que el tratamiento T3 (15 g L^{-1} de sulfato de cobre + 86 g L^{-1} de bicarbonato de sodio) presentó el menor peso promedio de las epífitas (1.39 g), diferenciándose estadísticamente del resto de tratamientos. El tratamiento T2 ocupó el segundo lugar en eficacia (3.30 g), mientras que el tratamiento testigo conservó los mayores valores de biomasa fresca.

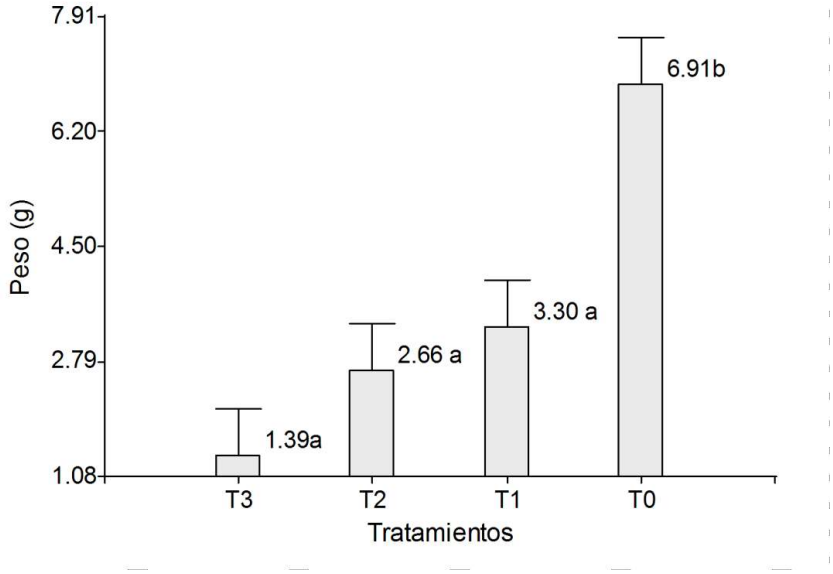


Figura 1. Peso (g) de las epifitas tratadas

La reducción progresiva del peso de las epífitas constituye uno de los primeros indicadores de pérdida de actividad fisiológica y refleja el inicio de los procesos de deshidratación inducidos por los tratamientos. En bromeliáceas atmosféricas como *Tillandsia recurvata*, el mantenimiento del peso fresco depende principalmente de la capacidad de los tricomas foliares para absorber agua atmosférica; por tanto, cualquier alteración en estas estructuras repercute directamente sobre el contenido hídrico de la planta (Benzing, 2000; Zotz, 2016). En el presente estudio, el incremento de la

concentración de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio produjo una respuesta dosis-dependiente, evidenciando una mayor reducción de biomasa conforme aumentó la concentración de ambos compuestos.

Desde el punto de vista fisiológico, el efecto observado puede atribuirse a la acción complementaria de ambos productos. El cobre induce alteraciones en la integridad de las membranas celulares, incrementa la producción de especies reactivas de oxígeno e inhibe diversos sistemas enzimáticos, provocando daño oxidativo y pérdida de viabilidad celular (Lamichhane et al., 2018; Kumar et al., 2021). Paralelamente, el bicarbonato de sodio modifica el potencial osmótico superficial de los tejidos y limita la absorción de agua por los tricomas, acelerando la deshidratación de la planta (Morón Torres, 2017). La combinación de ambos mecanismos explica la marcada disminución del peso fresco registrada en el tratamiento T3.

Los resultados obtenidos concuerdan con los reportados por Beltrán et al. (2020), quienes observaron reducciones significativas de la biomasa de *T. recurvata* mediante aplicaciones de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio en ecosistemas semiáridos de México. Asimismo, Velázquez (2011) informó que aplicaciones repetidas de bicarbonato de sodio disminuyeron considerablemente el peso fresco de la epífita, mientras que Morón Torres (2017) atribuyó dicho efecto al rápido proceso de deshidratación ocasionado por soluciones concentradas de bicarbonato. En conjunto, estos antecedentes respaldan que la reducción de biomasa constituye un indicador temprano y confiable de la eficacia de tratamientos dirigidos al manejo de *Tillandsia* spp.

Efecto de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio sobre la pérdida de humedad de *Tillandsia* spp.

El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos para la variable pérdida de humedad ($p \leq 0.05$), evidenciando que la combinación de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio afectó de manera importante el estado hídrico de *Tillandsia* spp. La prueba de comparación de medias de Duncan indicó que el tratamiento T3 (15 g L^{-1} de sulfato de cobre + 86 g L^{-1} de bicarbonato de sodio) produjo la mayor pérdida de humedad, alcanzando un promedio de 80.80 %, diferenciándose estadísticamente de los demás tratamientos. El tratamiento T2 presentó un efecto intermedio, mientras que el tratamiento testigo registró los menores valores.

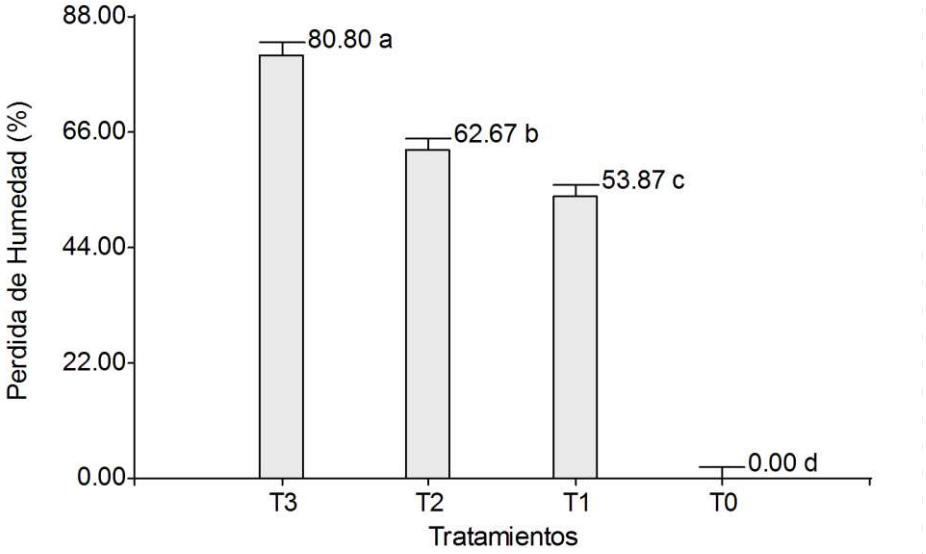


Figura 2. Perdida de humedad de las epifitas tratadas

La pérdida de humedad constituye uno de los principales indicadores de deterioro fisiológico en bromeliáceas atmosféricas, debido a que estas especies dependen casi exclusivamente de la absorción de agua mediante tricomas foliares especializados (Benzing, 2000; Zotz, 2016). En *Tillandsia recurvata*, los tricomas cumplen funciones esenciales en la captación y almacenamiento temporal de humedad atmosférica; por ello, cualquier alteración de estas estructuras compromete rápidamente el equilibrio hídrico y la supervivencia de la planta.

Los resultados obtenidos indican que el incremento de las concentraciones de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio produjo una respuesta dosis-dependiente, reflejada en un aumento progresivo de la deshidratación de las epífitas. Este comportamiento puede explicarse por la acción complementaria de ambos compuestos. El cobre provoca alteraciones en las membranas celulares y en los procesos metabólicos, favoreciendo la pérdida de integridad de los tejidos y el estrés oxidativo (Lamichhane et al., 2018; Kumar et al., 2021). Paralelamente, el bicarbonato de sodio genera cambios en el potencial osmótico y modifica las condiciones superficiales de los tejidos, reduciendo la capacidad de absorción de agua y acelerando el secado de la biomasa vegetal (Horst et al., 1992; Palmer et al., 1997).

Los elevados porcentajes de pérdida de humedad registrados en el presente estudio

coinciden con los resultados obtenidos por Morón Torres (2017), quien reportó que aplicaciones de bicarbonato de sodio provocaron una rápida deshidratación de *T. recurvata* en ecosistemas semiáridos de México. De manera similar, Reséndiz-Vega et al. (2024) observaron que soluciones concentradas de bicarbonato de sodio y mezclas con compuestos ácidos favorecieron el colapso fisiológico de la epífita, atribuyendo este efecto a la alteración de los mecanismos de absorción de agua.

Desde el punto de vista agronómico, la reducción del contenido de humedad tiene especial relevancia debido a que disminuye la capacidad de crecimiento y reproducción de la epífita, limita la emisión de nuevas estructuras vegetativas y favorece su desprendimiento natural de las ramas. Por tanto, la pérdida de humedad puede considerarse un indicador temprano de la eficacia de los tratamientos y un criterio útil para la evaluación de alternativas de manejo de *Tillandsia* spp. en sistemas citrícolas.

Efecto de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio sobre la mortalidad de *Tillandsia* spp.

La mortalidad de *Tillandsia* spp. fue significativamente influenciada por los tratamientos evaluados ($p \leq 0.05$). La prueba de Duncan mostró que el tratamiento T3 presentó el mayor porcentaje de mortalidad, alcanzando 70.74 %, seguido por T2, mientras que el tratamiento testigo registró la menor respuesta. Estos resultados evidencian que el incremento de las concentraciones de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio produjo un efecto positivo sobre el control de la epífita.

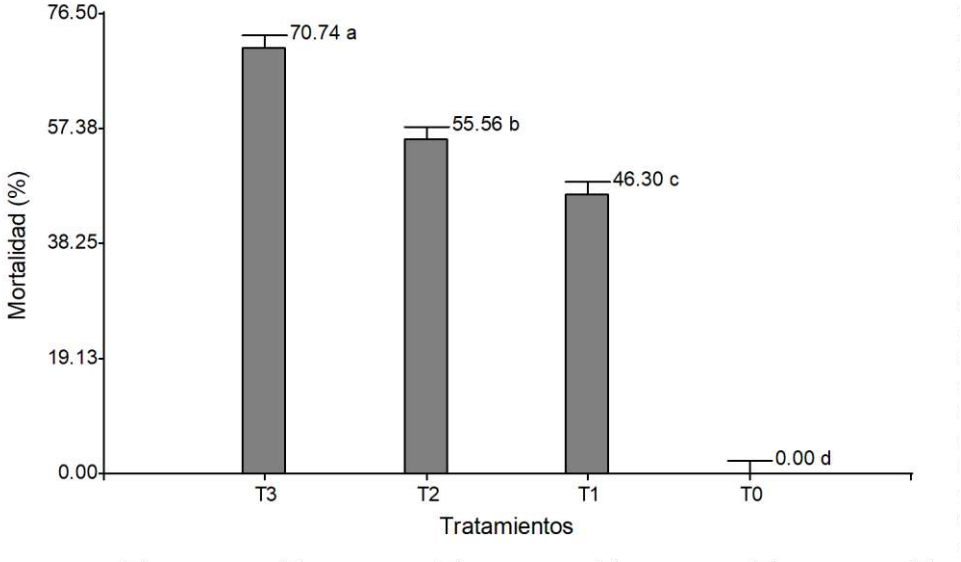


Figura 3. Muerte de las de las epifitas tratadas

La mortalidad observada en las plantas tratadas estuvo asociada con cambios visibles en la coloración y textura de los tejidos, manifestándose inicialmente mediante clorosis y desecación parcial, seguidas por necrosis progresiva y desprendimiento de los individuos muertos. Estos síntomas sugieren una alteración severa de los procesos fisiológicos relacionados con la absorción de agua, la fotosíntesis y el mantenimiento de la integridad celular.

El efecto letal del sulfato de cobre puede atribuirse a la acumulación de iones cúpricos en los tejidos, los cuales interfieren con diversas rutas metabólicas, afectan la actividad enzimática y promueven la formación de especies reactivas de oxígeno (Kumar et al., 2021). Por su parte, el bicarbonato de sodio incrementa el estrés osmótico y favorece la pérdida acelerada de humedad, intensificando el deterioro fisiológico de la planta. La interacción de ambos mecanismos probablemente explica los elevados niveles de mortalidad registrados en los tratamientos de mayor concentración.

Los resultados obtenidos concuerdan con investigaciones desarrolladas en México, donde diferentes autores reportaron niveles importantes de mortalidad de *Tillandsia recurvata* mediante el uso de bicarbonato de sodio y compuestos cúpricos (Morón Torres, 2017; Reséndiz-Vega et al., 2024).

Aunque la mortalidad alcanzada por el tratamiento T3 fue elevada, los resultados indican que el control no fue absoluto, lo que sugiere la necesidad de integrar aplicaciones químicas con prácticas complementarias como la remoción mecánica, poda sanitaria y monitoreo periódico. Esta estrategia coincide con los principios del manejo integrado de plagas, donde la combinación de diferentes métodos permite aumentar la eficiencia y reducir la probabilidad de recolonización.

Implicancias para el manejo integrado de *Tillandsia* spp. en cítricos

Los resultados de la presente investigación demuestran que la combinación de sulfato de cobre y bicarbonato de sodio constituye una alternativa técnica viable para reducir la biomasa, el contenido de humedad y la supervivencia de *Tillandsia* spp. en plantaciones de cítricos. El tratamiento T3 mostró la mayor eficacia biológica, evidenciando una respuesta dependiente de la dosis aplicada.

Asimismo, la utilización de bicarbonato de sodio representa una alternativa de interés debido a su bajo costo, amplia disponibilidad y menor impacto ambiental respecto a otros compuestos químicos. Por otro lado, aunque el sulfato de cobre contribuye significativamente al control de la epífita, su uso debe realizarse bajo criterios técnicos que eviten la acumulación excesiva de cobre en el suelo y reduzcan posibles efectos sobre organismos benéficos (Reséndiz-Vega et al., 2024; Lamichhane et al., 2018).

En conjunto, los resultados obtenidos proporcionan evidencia científica para el desarrollo de estrategias sostenibles de manejo de *Tillandsia* spp. en sistemas citrícolas del Perú y constituyen una base técnica para futuras investigaciones orientadas a optimizar dosis, frecuencias de aplicación y combinaciones de productos compatibles con los principios de la agricultura sostenible.

Conclusiones

La aplicación combinada de sulfato de cobre a 15 gramos por litro y bicarbonato de sodio a 86 gramos por litro demostró ser altamente efectiva contra la *Tillandsia recurvata*, logrando un impacto significativo en la reducción de su peso, alcanzando los mayores porcentajes de mortalidad y acelerando notablemente la pérdida de humedad en el menor tiempo.

Literatura citada

Alcocer, A. B., & Ramales, M. M. (2026). Manejo de Tillandsia recurvata en un Bosque Espinoso en el Municipio de Lagos de Moreno, Jalisco. *Scientia Tecnológica*, *3*(3). https://doi.org/10.66326/revscitec.v3.n3.2026.0108

Alvarado-Rosales, D., & de Lourdes Saavedra-Romero, L. (2024). Situación del musgo bola (Tillandsia recurvata L.) en un área verde institucional: Ball moss (Tillandsia recurvata L.) situation in an institutional green area. *e-CUCBA*, (21), 25-35. https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi21.320

Benzing, D. H. (2000). *Bromeliaceae: Profile of an Adaptive Radiation*. Cambridge: Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511565175

Flores-Palacios, A. (2016). Structural parasitism in vascular epiphytes. *Plant Biology*, 18(3), 516–521. https://doi.org/10.1111/plb.12406

Flores-Palacios, A., & García-Franco, J. G. (2006). The relationship between tree size and epiphyte species richness: testing four different hypotheses. *Journal of Biogeography*, 33(2), 323–330. https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01382.x

García-García, N. V., Valencia-Díaz, S., Vergara-Torres, C. A., Rios, M. Y., Morales-Linares, J., & Flores-Palacios, A. (2025). Direct and indirect effects of the epiphyte Tillandsia recurvata (Bromeliaceae) on the growth of three of its phorophytes: A greenhouse experiment. *Plant Biology*, *27*(4), 622-629. https://doi.org/10.1111/plb.70028

Givnish, T. J., et al. (2014). Adaptive radiation, correlated and contingent evolution, and net species diversification in Bromeliaceae. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 71, 55–78. https://doi.org/10.1016/j.ympev.2013.10.010

Gómez-Ramírez, A., Guevara-Herrera, R., Licona, M. G., & López-Maldonado, E. (2023). Reporte de aplicación de tratamientos de vinagre y carbonato para el control de Tillansia recurvata: The application report of carbonate and vinegar treatments for the control of Tillansia recurvata. *e-CUCBA*, (20), 151-159. https://doi.org/10.32870/ecucba.vi20.307

Gouda, E. J., Butcher, D., & Gouda, C. S. (2025). *Encyclopedia of Bromeliads*. Utrecht University Herbarium. Disponible en: https://padme.rbge.org.uk/bromos/].

Hawksworth, F. G. (1977). *The 6-class dwarf mistletoe rating system* (Vol. 48). Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=n0_1cXYe0r0C&oi=fnd&pg=PA1&dq=hawksworth+1977+rating+system&ots=iWpzkc-q-Q&sig=dQaZ5YTSx5v59y0dBjH7AHaie4w&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Horst, R. K., Kawamoto, S. O., & Porter, L. L. (1992). Effect of sodium bicarbonate and oils on the control of powdery mildew and black spot of roses. *Plant Disease*, 76(3), 247–251. https://doi.org/10.1094/PD-76-0247

Kumar, V., et al. (2021). Copper bioavailability, uptake, toxicity and tolerance in plants: A comprehensive review. *Chemosphere*, 262, 127810. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127810

Lamichhane, J. R., Osdaghi, E., Behlau, F., Köhl, J., Jones, J. B., & Aubertot, J. N. (2018). Thirteen decades of antimicrobial copper compounds applied in agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(3), 28. https://doi.org/10.1007/s13593-018-0503-9

Ortega, Y. H., Aceves, Y. P., Cano, L. B., & Pérez, L. A. J. (2026). Aprovechamiento de Tillandsia Recurvata (Heno Motita, Paxtle) para la elaboración de piel vegetal. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, *13*(26), 136-145. https://doi.org/10.29057/escs.v13i26.16904

Palmer, C. L., Horst, R. K., & Langhans, R. W. (1997). Use of bicarbonates to inhibit in vitro colony growth of Botrytis cinerea. *Plant Disease*, 81(12), 1432–1438. https://doi.org/10.1094/PDIS.1997.81.12.1432

Reséndiz-Vega, M., & Sánchez-Trujillo, G. (2021). Environmental function and control of heno motita (Tillandsia recurvata) in the atmospheric basin of Tula de Allende Hidalgo. *Journal of Environmental Sciences and Natural Resources*, 7-19. https://doi.org/10.35429/JESN.2021.19.7.19.30

Reséndiz-Vega, M., García-Melo, J. A., & Hernández-Sánchez, E. (2024). Effectiveness of acetic acid, sodium bicarbonate and vinegar/bicarbonate mixtures to control Tillandsia recurvata. *Journal of Innovative Engineering*, 8(22), 7–19. https://doi.org/10.35429/JIE.2024.22.8.7.19

Reséndiz-Vega, M., García-Melo, J. A., & Hernández-Sánchez, E. (2024). Effectiveness of acetic acid, sodium bicarbonate and the vinegar/baking soda mixture to control the population of motita hay (Tillandsia recurvata) on the campus of the TulaTepejí Technological University. *Journal of Innovative Engineering/Revista de Ingenieria Innovativa*, *8*(22). https://doi.org/10.35429/JIE.2024.22.8.7.19

Zotz, G. (2016). *Plants on Plants: The Biology of Vascular Epiphytes*. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39237-0

Evaluación de alternativas para el control químico y biológico de enfermedades en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) en dos variedades de interés comercial en Colima, México

Nayeli Sarahí Quiñones Islas[18], Rubén Ortega Arreola[19], Raquel Roque Ruvalcaba[20], Juan Fabricio Lazcano Escobar[3]

Resumen

El cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) enfrenta importantes pérdidas de rendimiento debido a enfermedades fungosas como la piricularia (*Magnaporthe oryzae*) y el manchado de grano (*Helminthosporium oryzae*), por lo que es necesario identificar alternativas de manejo fitosanitario eficientes y sostenibles. El objetivo de este estudio fue evaluar fungicidas de síntesis química, un inductor de resistencia, un agente de control biológico y la tolerancia varietal para el manejo de enfermedades en condiciones de campo en Colima, México. El experimento se estableció en julio-noviembre de 2024 en Buenavista, Cuauhtémoc, Colima, utilizando las variedades Milagro Filipino y Silverio. Se evaluaron nueve tratamientos bajo un diseño de parcelas divididas en bloques al azar con cuatro repeticiones. La incidencia y severidad de las enfermedades se calificaron mediante el Sistema de Evaluación Estándar (SES) del Instituto Internacional de Investigaciones en Arroz (IRRI) y los datos se analizaron con pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis y Dunn (α=0.05). No se detectó incidencia de piricularia en hoja, manchado de grano ni *Burkholderia glumae*. Se observaron diferencias significativas ($p<0.001$) entre tratamientos para la incidencia y severidad de piricularia en cuello de panícula y nudos, así como para la fertilidad de espiguillas. Los tratamientos con difeconazole y la mezcla mancozeb + azoxistrobin + tebuconazole presentaron los menores niveles de incidencia y severidad de la enfermedad. Los resultados indicaron que ambas alternativas químicas representan las opciones más promisorias para el manejo de piricularia bajo las condiciones de producción evaluadas en Colima.

[18] Campo Experimental Tecomán. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km. 35 Carretera Colima – Manzanillo, Tecomán, Colima. C.P. 28100. México
[19] Campo Experimental Santiago Ixcuintla. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km. 6 Carretera Internacional México – Nogales entronque Santiago Ixcuintla, Nayarit. México
[20] Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. Camino Arenero 1227, El Bajío, Zapopan, Jalisco. C.P. 45019. México

Palabras clave: Piricularia, manchado de grano, control biológico, inductor de resistencia, fungicidas

Abstract

Rice (*Oryza sativa* L.) production is severely affected by fungal diseases such as rice blast (*Magnaporthe oryzae*) and brown spot (*Helminthosporium oryzae*), making it essential to identify efficient and sustainable disease management strategies. The objective of this study was to evaluate synthetic fungicides, a resistance inducer, a biological control agent, and varietal tolerance for disease management under field conditions in Colima, Mexico. The experiment was established during the July–November 2024 growing season in Buenavista, Cuauhtémoc, Colima, using the rice cultivars Milagro Filipino and Silverio. Nine treatments were evaluated using a split-plot
randomized complete block design with four replications. Disease incidence and severity were assessed according to the International Rice Research Institute (IRRI) Standard Evaluation System
(SES), and the data were analyzed using the nonparametric Kruskal–Wallis and Dunn tests ($\alpha = 0.05$). No incidence of leaf blast, grain discoloration, or *Burkholderia glumae* was detected. Significant differences ($p < 0.001$) among treatments were observed for the incidence and severity of panicle neck and node blast, as well as for spikelet fertility. Treatments with difenoconazole and the mixture of mancozeb + azoxystrobin + tebuconazole showed the lowest disease incidence and severity. These results indicate that both chemical treatments are the most promising alternatives for rice blast management under the production conditions evaluated in Colima, Mexico.

Keywords: Pyricularia, grain spot, biocontrol, elicitor, fungicides

Introducción

El arroz (*Oryza sativa* L.) constituye uno de los cultivos alimentarios más importantes del mundo y representa la base de la dieta para una gran proporción de la población global, por lo que cualquier factor que reduzca su productividad tiene implicaciones directas sobre la seguridad alimentaria y la estabilidad de los sistemas agrícolas (Nalley *et al*., 2016; Skamnioti y Gurr, 2009). Entre las principales limitantes fitosanitarias del cultivo destacan las enfermedades fungosas, las cuales pueden ocasionar pérdidas severas en rendimiento y calidad del grano, especialmente cuando coinciden con condiciones ambientales favorables para el desarrollo del patógeno y con materiales susceptibles (Skamnioti y Gurr, 2009; S Kongcharoen *et al*., 2020).

Dentro de este grupo de enfermedades se encuentran el manchado de grano (*Helminthosporium oryzea) y* la piricularia (*Magnaporthe oryzae)*, esta última reconocida como uno de los problemas fitopatológicos más destructivos del arroz a nivel mundial (Skamnioti y Gurr, 2009). Su importancia radica en su capacidad para afectar diferentes órganos de la planta, incluyendo hojas, nudos y panículas, lo que puede traducirse en disminución del área fotosintética, menor llenado de grano y reducción del rendimiento final (Asibi, Chai y Coulter, 2019). Además, el impacto económico de la piricularia trasciende la parcela, ya que las pérdidas asociadas a esta enfermedad pueden influir en la disponibilidad y el precio del arroz en mercados regionales e internacionales (Nalley *et al*., 2016; Admasu, 2020).

Frente a este panorama, el manejo de enfermedades en arroz ha dependido históricamente del uso de fungicidas sintéticos; sin embargo, la necesidad de mejorar la sostenibilidad de los sistemas productivos ha impulsado la búsqueda de alternativas complementarias basadas en agentes biológicos, extractos vegetales y productos con diferente modo de acción (Persaud *et al*., 2021). En años recientes, diversos estudios han demostrado que tanto los fungicidas de nueva generación como algunas herramientas biológicas pueden reducir la severidad de la enfermedad y contribuir a mejorar el desempeño agronómico del cultivo, aunque su eficacia depende del patógeno involucrado, la oportunidad de aplicación y las condiciones locales de producción (Admasu, 2020; Kongcharoen *et al*., 2020; Persaud *et al*., 2021).

En este sentido, la evaluación comparativa de alternativas químicas y biológicas bajo condiciones de campo resulta indispensable para identificar tratamientos con mayor potencial de uso en programas de manejo fitosanitario (Kongcharoen *et al*., 2020; Persaud *et al*., 2021). Asimismo, la comparación experimental permite distinguir cuáles productos muestran efectos consistentes sobre incidencia, severidad y variables agronómicas asociadas al desempeño del cultivo. La medición de la respuesta fitopatológica y agronómica en arroz se apoya con frecuencia en escalas estandarizadas, entre las que destaca el Sistema de Evaluación Estándar para Arroz, desarrollado para proporcionar un lenguaje común para facilitar la comparación de materiales, tratamientos y ambientes (IRRI, 2013).

Bajo este contexto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el manejo integral del efecto de fungicidas de síntesis química e inductores de resistencia, junto con un control biológico y la tolerancia varietal, sobre el control de Piricularia (*Magnaporthe oryzae*) y manchado de grano (*Helminthosporium oryzea*) en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) en la zona productora del estado de Colima en México.

Materiales y métodos

La parcela experimental fue establecida en el terreno de productor cooperante en la localidad de Buenavista, municipio de Cuauhtémoc en el estado de Colima (19º15′44.0″N, 103º34′27″O, latitud 19.262230, longitud -103.574182), en el ciclo de producción julio-noviembre del año 2024. Se utilizaron dos variedades Milagro filipino y Silverio. Se empleo un diseño experimental de parcelas dividas con distribución de bloques al azar con cuatro repeticiones, dando un total de 72 parcelas experimentales. La unidad experimental estuvo conformada por parcelas de 2 m de ancho por 6 m de largo, con una separación de 0.5 m entre tratamientos y 1.5 m entre calles.

Se realizaron dos evaluaciones en campo de las enfermedades presentes, una antes de la aplicación de los tratamientos y la segunda cinco días después de esta. Se efectuaron dos aplicaciones por ciclo; la primera al inicio del primordio panicular, aproximadamente a los 60 días de la siembra, y la segunda en la etapa de embuche, a los 100 días de la siembra. En el caso del testigo absoluto, solo se realizó una aplicación en la etapa de embuche. Se evaluaron nueve tratamientos, ocho alternativas de control biológico y químico comercialmente disponibles y un testigo absoluto (Cuadro 1). Se emplearon 2.5 litros de agua y se le agregaron 2 ml de adherente AgroADH para la aplicación de cada tratamiento.

Cuadro 1. Tratamientos, ingrediente activo y dosis empleada

Número de tratamiento	Ingrediente Activo	Dosis por 2.5 ml de agua/ Dosis por parcela
1	Azoxistrobin y ciproconazol	6.5 ml
2	Azoxistrobin	6.5 ml
3	Difeconazole	6.5 ml
4	Cloruro de calcio tribásico de cobre	25 g
5	Mancozeb, Azoxistrobin y Tebuconazole	12.5 ml
6	Kasugamicina	6.5 ml
7	Trichoderma (1×10^{9} Esporas/dosis.)	10 gramos
8	Fosfito de potasio	12.5 ml
9	Testigo absoluto	0.0 ml

La base de datos incluyó número de parcela, tratamiento, acame, fertilidad de espiguillas (SpFert), así como la evaluación de incidencia y severidad de las enfermedades presentes: Piricularia en la hoja (BI), Piricularia en el cuello de la panícula y en los nudos (NBI), Mancha café (BS), Decoloración de las glumas o manchado del grano (GDI) y *Burkholderia glumae* o tizón del arroz (*Bg*). La evaluación de incidencia y severidad de daño por enfermedades se realizó de acuerdo con el sistema de evaluación estándar (SES) del Instituto Internacional de Investigaciones en Arroz (IRRI, 2013), el cual utiliza escalas

ordinales para la calificación de características agronómicas y fitopatológicas (Cuadro 2). Algunas de las variables correspondieron a respuestas discretas o semi-cuantitativas.

Cuadro 2. Escala de evaluación de incidencia y severidad de las enfermedades presentes en el cultivo de arroz de acuerdo con el sistema de evaluación estándar (SES) del IRRI

Escala	Grado de daño
0	Ninguna lesión visible
1	Menos del 1%
3	1 – 5%
5	6 – 25%
7	26 – 50%
9	51 – 75%

El análisis estadístico se realizó a partir de la información registrada en campo, los datos fueron organizados por parcela y se revisados para detectar inconsistencias, variables sin variación y encabezados no estandarizados. Posteriormente se generó una base depurada para el análisis estadístico. Como primer paso se realizó un análisis descriptivo global y por tratamiento, calculando media, mediana, desviación estándar (DE), valor mínimo y valor máximo para cada variable con variación útil.

Debido a que las variables provinieron de escalas ordinales del sistema SES y mostraron distribución discreta, asimetría y abundancia de valores repetidos, se optó por un enfoque no paramétrico. Para contrastar el efecto de los tratamientos se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis en las variables con variación útil, esta prueba permite comparar varios grupos independientes sin asumir normalidad (Kruskal y Wallis, 1952). Cuando el contraste global resultó significativo, se realizaron comparaciones múltiples por pares mediante la prueba de Dunn con ajuste por multiplicidad, con el fin de identificar qué tratamientos difirieron entre sí y reducir el riesgo de error tipo I (Dunn, 1964). El nivel de significancia utilizado fue de 0.05. Los análisis estadísticos fueron realizados en el programa estádistico R (R Core Team, 2025).

Resultados y discusión

El análisis inicial mostró que acame, incidencia y severidad de Piricularia en la hoja (BI), incidencia y severidad en Manchado del grano (GDI) e incidencia y severidad de *Burkholderia glumae* (*Bg*) permanecieron constantes en todos los registros (sin ninguna lesión visible, valor 0 en la escala SES del IRRI), por lo que se describieron únicamente de forma resumida y no fueron consideradas en el análisis inferencial. En contraste, la fertilidad de espiguillas (SpFert), incidencia y severidad de Piricularia en el cuello de la panícula y en

los nudos (NBI), incidencia y severidad de mancha café (BS) mostraron variación entre tratamientos (Cuadro 3).

Cuadro 3. Resumen global de las variables evaluadas

Variable	Niveles	Media	Mediana	DE	Mín	Máx
Acame	1	0.00	0.00	0.00	0	0
SpFert	2	2.50	3.00	0.87	1	3
BI-Incidencia	1	0.00	0.00	0.00	0	0
BI-Severidad	1	0.00	0.00	0.00	0	0
NBI-Incidencia	4	6.50	7.00	1.95	3	9
NBI-Severidad	5	5.81	7.00	1.98	1	9
BS-Incidencia	4	1.00	1.00	0.79	0	3
BS-Severidad	3	0.96	1.00	0.74	0	3
GDI-Incidencia	1	0.00	0.00	0.00	0	0
GDI-Severidad	1	0.00	0.00	0.00	0	0
Bg-Incidencia	1	0.00	0.00	0.00	0	0
Bg-Severidad	1	0.00	0.00	0.00	0	0

La prueba de Kruskal-Wallis detectó diferencias significativas entre tratamientos para SpFert, NBI-Incidencia y NBI-Severidad, mientras que para BS-Incidencia y BS-Severidad no presentaron diferencias estadísticas (Cuadro 4). Estos resultados indicaron que la respuesta de los tratamientos fue más evidente para NBI (Piricularia en el cuello de la panícula y en los nudos) y en la SpFert (fertilidad de espiguillas), mientras que la variable BS (mancha café) mostró un comportamiento más homogéneo.

Cuadro 4. Prueba de Kruskal – Wallis para comparación entre tratamientos

Variable	H	p	Interpretación
SpFert	30.2407	0.0001916	Diferencias significativas
NBI-Incidencia	28.7616	0.0003491	Diferencias significativas
NBI-Severidad	29.4195	0.0002676	Diferencias significativas
BS-Incidencia	10.9223	0.2061	Sin diferencias significativas
BS-Severidad	10.4644	0.2339	Sin diferencias significativas

A nivel descriptivo, los tratamientos 3 y 5 registraron las medias y medianas más bajas para NBI-Incidencia y NBI-Severidad, lo que sugiere un mejor desempeño relativo. Por el contrario, los tratamientos 4 y 9 mostraron los valores más altos en ambas variables, lo que indica una menor eficacia para reducir la respuesta sanitaria evaluada (Cuadro 5).

Cuadro 5. Registro de datos descriptivos por tratamiento

Tratamiento	SpFert	SpFert mediana	NBI Incidencia	NBI Incidencia	NBI Severidad	NBI Severidad	BS Incidencia	BS Severidad

	media	a	a media	a mediana	d media	d mediana	a media	d media
1	3.00	3.00	7.00	7.00	6.50	7.00	0.88	0.88
2	2.75	3.00	7.25	7.00	6.25	7.00	0.88	0.75
3	1.75	1.00	4.50	5.00	3.75	4.00	0.62	0.62
4	3.00	3.00	8.25	9.00	7.50	7.00	1.62	1.38
5	1.50	1.00	4.75	5.00	3.75	3.00	0.50	0.50
6	2.50	3.00	6.00	5.00	5.75	5.00	1.12	1.12
7	3.00	3.00	6.50	7.00	5.75	5.00	0.88	0.88
8	2.00	2.00	6.25	5.00	5.50	6.00	1.12	1.12
9	3.00	3.00	8.00	9.00	7.50	7.00	1.38	1.38

Las comparaciones múltiples por pares confirmaron diferencias significativas entre los tratamientos 3-4, 3-9, 4-5 y 5-9 para NBI-Incidencia y NBI-Severidad, reforzando la separación entre los tratamientos de mejor y peor comportamiento. En SpFert también se detectaron diferencias, destacando el tratamiento 5 como un grupo con comportamiento diferenciado frente a tratamientos con valores más altos.

Conclusiones

Se logro identificar que las alternativas para el control químico y biológico de enfermedades en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) representadas por los tratamientos 3 (Difeconazole) y 5 (Mancozeb, Azoxistrobin y Tebuconazole) siendo las más prometedoras dentro del grupo evaluado al presentar el mejor desempeño relativo registrando los menores niveles de incidencia y severidad para NBI (Piricularia en el cuello de la panícula y en los nudos), mientras que los tratamientos 4 (Cloruro de calcio tribásico de cobre) y 9 (testigo absoluto) mostraron el comportamiento menos favorable al presentar los valores más altos. Dado que el sistema SES se basa en escalas ordinales y que varias respuestas mostraron distribución discreta, la aplicación de pruebas no paramétricas resultó la adecuada para preservar la validez de la inferencia.

El uso de la prueba de Kruskal-Wallis y del procedimiento de Dunn permitió analizar adecuadamente variables ordinales y discretas derivadas del sistema SES, manteniendo congruencia entre la naturaleza de los datos y el enfoque estadístico utilizado. Estos resultados aportan evidencia para la selección de alternativas de manejo fitosanitario con mayor potencial bajo condiciones de campo en el cultivo del arroz para el estado de Colima y con potencial para replicarse en estados que presenten caracteristicas edafoclimaticas similares.

Literatura Citada

Admasu, S. (2020). Two major fungal diseases of rice (*Oryza sativa* L.) and management methods: Review. *Agricultural Extension Journal*. https://doi.org/10.22377/aextj.v4i2.216

Asibi, A. E., Chai, Q., & Coulter, J. A. (2019). Rice blast: A disease with implications for global food security. *Agronomy, 9*(8), 451. https://doi.org/10.3390/agronomy9080451

Dunn, O. J. (1964). Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics, 6*(3), 241–252. https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181

International Rice Research Institute. (2013). *Standard evaluation system for rice (SES)* (5th ed.). IRRI. https://ricepedia.blogspot.com/2018/04/2013-irri-ses-standard-evaluation.html

Kongcharoen, N., Kaewsalong, N. & Dethoup, T. Efficacy of fungicides in controlling rice blast and dirty panicle diseases in Thailand. Sci Rep 10, 16233 (2020). https://doi.org/10.1038/s41598-020-73222-w

Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association, 47*(260), 583–621. https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441

Nalley, L. L., Tsiboe, F., Durand-Morat, A., Shew, A., & Thoma, G. (2016). Economic and environmental impact of rice blast pathogen (*Magnaporthe oryzae*) alleviation in the United States. *PLoS ONE, 11*(12), e0167295. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0167295

Persaud, R., Saravanakumar, D., Persaud, M., & Seepersad, G. (2021). Biologicals and new generation fungicides in the management of blast disease in rice. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 5*, 797441. https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.797441

R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Skamnioti, P., & Gurr, S. J. (2009). Against the grain: Safeguarding rice from rice blast disease. *Trends in Biotechnology, 27*(3), 141–150. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2008.12.002

Evaluación de incidencia y severidad de roya (*Hemileia vastatrix)* en tres variedades de café (*Coffea arabica*) establecidas en el Sitio Experimental Teocelo, Veracruz

Karen Yoali Hernández-Gutiérrez[21], Edgar Couttolenc-Brenis[22]

Resumen

La roya (*Hemileia vastatrix*) es la enfermedad foliar de mayor impacto económico en el café (*Coffea arabica* L.). El objetivo fue evaluar la incidencia y severidad de roya en tres variedades durante un ciclo productivo, para identificar diferencias varietales en su progresión temporal. El estudio se realizó en el Sitio Experimental Teocelo del INIFAP, Veracruz, México (abril 2025-febrero 2026). Se evaluaron Catuaí, Icatú y Oro Azteca, con 20 plantas marcadas por variedad monitoreadas en cinco tiempos de muestreo (T1 a T5), para un total de 300 observaciones. La incidencia se determinó como porcentaje de hojas con roya y la severidad, con el Diagrama de Área Estándar de López-Vásquez et al. (2018). Los datos se analizaron con modelos lineales generalizados mixtos (distribución beta para incidencia y gamma para severidad); se compararon cuatro estructuras de efectos mediante los criterios de información de Akaike (AIC) y bayesiano (BIC). El modelo con ambos factores fijos y su interacción presentó el mejor ajuste en ambas variables y fue el seleccionado. El tiempo de muestreo fue determinante: la incidencia alcanzó 92.9 % en T5 y la severidad pasó de 0.97 % en T1 a 4.23 % en T5. La variedad no influyó en la incidencia ($p = 0.2645$), pero sí en la severidad ($p = 0.0041$): Oro Azteca registró la severidad media más alta (2.40 %) frente a Catuaí (1.70 %) e Icatú (1.71 %). La severidad resultó el descriptor más sensible para discriminar el comportamiento varietal frente a *H. vastatrix* en campo.

Palabras clave: resistencia varietal, epidemiología foliar, modelos lineales generalizados mixtos.

Abstract

[21] Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Veracruzana. Lomas del Estadio s/n C.P. 91000, Xalapa, Veracruz. yoalihernandezgtz@gmail.com
[22] Instituto Nacional de Investigación Forestal Agrícola y Pecuaria, Campo Experimental Cotaxtla, Sitio Experimental Teocelo. Km. 3.5 Carr. Xalapa-Veracruz. Colonia Ánimas. C.P. 91190. Xalapa, Veracruz. couttolenc.edgar@inifap.gob.mx

Coffee leaf rust (Hemileia vastatrix) is the foliar disease with the greatest economic impact on coffee (Coffea arabica L.). The objective was to evaluate rust incidence and severity in three coffee varieties over one production cycle, to identify varietal differences in its temporal progression. The study was conducted at the INIFAP Teocelo Experimental Site, in Veracruz, Mexico, between April 2025 and February 2026. Catuaí, Icatú and Oro Azteca were evaluated, with 20 tagged plants per variety monitored at five sampling times (T1 to T5), for a total of 300 observations. Incidence was determined as the percentage of leaves with rust, and severity using the Standard Area Diagram of López-Vásquez et al. (2018). Data were analyzed with generalized linear mixed models (beta distribution for incidence and gamma for severity); four effect structures were compared using the Akaike (AIC) and Bayesian (BIC) information criteria. The model with both factors fixed and their interaction showed the best fit for both variables and was selected. Sampling time was the determining factor for both variables: incidence remained low at T1-T2, increased from T3 onward and reached 92.9 % at T5, whereas severity rose from 0.97 % at T1 to 4.23 % at T5. Variety did not influence incidence ($p = 0.2645$), but it did influence severity ($p = 0.0041$): Oro Azteca recorded the highest mean severity (2.40 %) compared with Catuaí (1.70 %) and Icatú (1.71 %). Severity proved to be the most sensitive descriptor for discriminating varietal behavior against *H. vastatrix* under field conditions.

Keywords: varietal resistance, foliar epidemiology, generalized linear mixed models.

Introducción

La roya del cafeto, causada por el hongo biotrófico *Hemileia vastatrix* Berk. & Broome, es una de las enfermedades foliares de mayor impacto económico en el cultivo del café (*Coffea arabica* L.) a nivel mundial (Avelino et al., 2018; Rhiney et al., 2021). Esta enfermedad se manifiesta en masas de esporas de color anaranjado en el envés foliar, y puede llegar a provocar la defoliación progresiva de la planta y a una reducción de su capacidad fotosintética, con efectos directos sobre el volumen de cosecha y la calidad del grano (Rhiney et al., 2021).

Los daños que ocasiona la roya del café pueden clasificarse en dos categorías, por un lado, las pérdidas primarias, relacionadas con la caída de frutos y la necrosis de ramas, y por otro, las pérdidas secundarias, derivadas del desgaste energético que la planta invierte en su recuperación (Pale-Ezquivel et al., 2023). Además, tras episodios epidémicos severos es

frecuente observar una disminución sostenida en la producción de frutos durante los ciclos productivos posteriores (Avelino et al., 2015) y en términos de magnitud, las pérdidas atribuibles a la roya se estiman comúnmente entre el 15% y el 20%, aunque bajo condiciones de cultivo desfavorables pueden alcanzar hasta un 70% (Adepoju et al., 2017).

En México, este panorama adquiere particular relevancia dado que el cultivo de café es considerado como estratégico en la política agrícola del país (Plan Nacional de Desarrollo 2025-2030). Anualmente se produce un volumen cercano a 1,056,317 toneladas de café cereza, del cual el estado de Veracruz aporta alrededor del 24% de la producción nacional, consolidándose como la segunda entidad productora, solo superada por Chiapas (SIAP, 2024). Esta dinámica productiva se sustenta principalmente en la especie *C. arabica* L., que ocupa aproximadamente el 96% de la superficie cultivada en el país (Gasperín-García et al., 2023), y las variedades de esta especie tradicionalmente plantadas presentan una mayor susceptibilidad a la roya. Por lo que, se ha impulsado la adopción de variedades con distintos niveles de tolerancia o resistencia genética para sustituir las tradicionales.

Sin embargo, la resistencia varietal frente a la roya no es estática y su expresión puede variar en función de las condiciones ambientales, la presión de inóculo y la fenología del cultivo a lo largo del año (Sera et al., 2022; Lima et al., 2025), por lo que resulta necesario dar seguimiento temporal a su comportamiento en condiciones de campo. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la incidencia y severidad de la roya del café en tres variedades de café a lo largo de un ciclo productivo con el fin de identificar diferencias varietales en la progresión temporal de la enfermedad.

Materiales y métodos

El presente trabajo se realizó en el Sitio Experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en el municipio de Teocelo, Veracruz, México, con latitud norte de 19°23'34.1" y longitud oeste 97°00'03.5", a 1,250 m s.n.m., entre abril de 2025 y febrero de 2026.

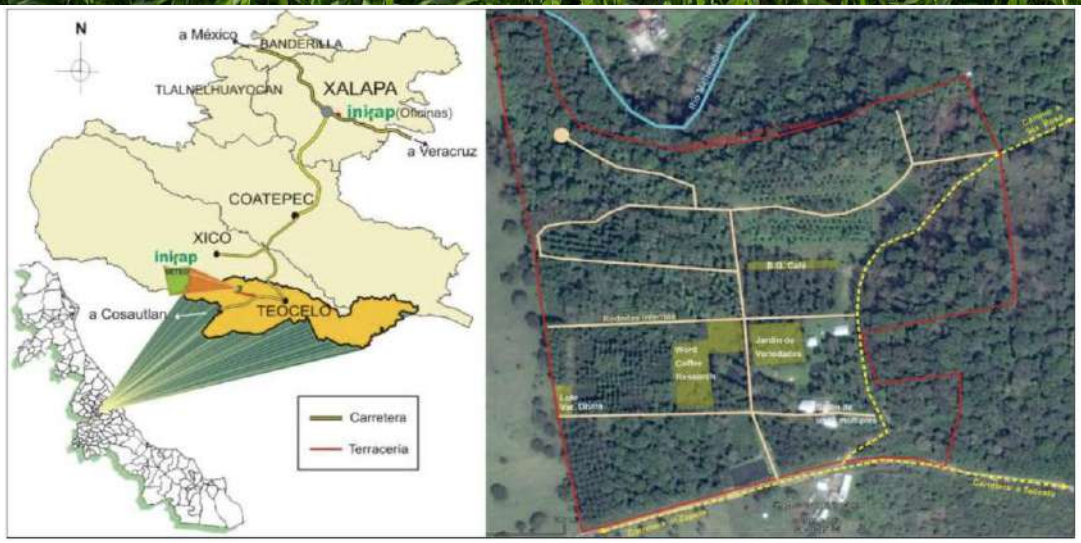


Figura 1. Ubicación SE Teocelo, INIFAP. Fuente: Elaboración propia.

Se evaluaron tres variedades de café (*C. arabica* L.): Catuaí, Icatú y Oro Azteca (OA). En cada variedad se seleccionaron 20 plantas como unidades experimentales, las cuales fueron marcadas y monitoreadas de forma repetida en cinco tiempos de muestreo: T1 (abril 2025), T2 (junio 2025), T3 (septiembre 2025), T4 (diciembre 2025) y T5 (febrero 2026), para un total de 300 observaciones (3 variedades × 20 plantas × 5 tiempos). El análisis de los datos correspondió a un arreglo de medidas repetidas en el tiempo, donde la variedad constituyó el factor entre-sujetos y el tiempo de muestreo el factor intra-sujetos.

Variables evaluadas

En cada planta y tiempo de muestreo se determinaron dos variables respuesta asociadas a la roya del café midiendo la rama más grande del tercio medio de la planta según lo propuesto en el Diagrama de Área Estándar para la estimación visual de severidad de roya del cafeto desarrollado por López-Vásquez et al. (2018):

Incidencia: corresponde al porcentaje de plantas u órganos que presentan síntomas de la enfermedad dentro de un lote o área determinada, es decir, refleja cuántos individuos u órganos de la muestra o población están afectados (Ecuación 1).

$$Incidencia\ (\%) = \frac{\sum total\ de\ hojas\ con\ roya}{\sum total\ de\ hojas} \times 100 \qquad (1)$$

Severidad: corresponde al porcentaje del tejido u órgano afectado por la enfermedad en las plantas evaluadas, es decir, expresa el grado o intensidad del daño presente en los individuos u órganos de la muestra o población (Ecuación 2).

$$Severidad\ (\%) = \frac{\sum total\ del\ área\ con\ roya}{\sum total\ de\ hojas} \times 100 \qquad (2)$$

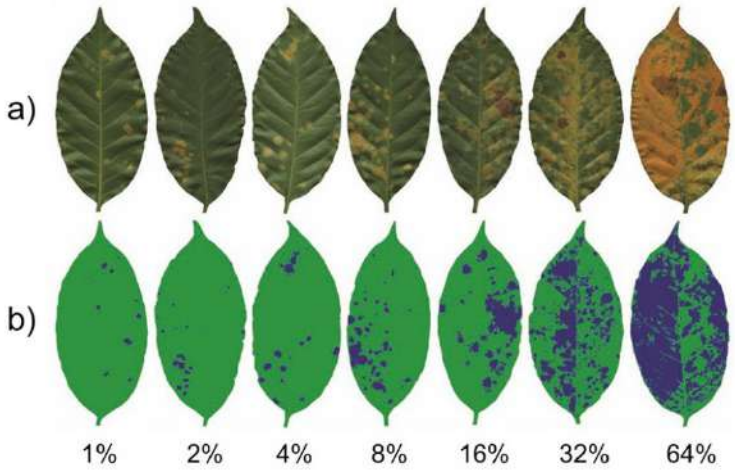


Figura 2. Diagrama de Área Estándar para la estimación visual de severidad de roya. Fuente: López-Vásquez et al. (2018).

Análisis estadístico

Los datos de incidencia (%) y severidad (%) de roya se analizaron mediante Modelos Lineales Generalizados Mixtos (GLMM), ajustados con el paquete glmmTMB en el software estadístico R (versión 4.5.2). Para la variable Incidencia se ajustó un modelo con distribución Beta y función de enlace logit, aplicando la transformación de Smithson y Verkuilen (2006) para acotar los valores extremos de 0 y 100%. Para la variable Severidad, se ajustó un modelo con distribución Gamma y función de enlace log. En ambos casos, Variedad (Catuaí, Icatú, OA) y Tiempo de muestreo (T1 a T5) se incluyeron como efectos fijos, junto con su interacción Variedad × Tiempo. La selección de la estructura de efectos se realizó comparando cuatro modelos alternativos (Variedad y Tiempo fijos; Variedad fija y Tiempo aleatorio; Variedad aleatoria y Tiempo fijo; y ambos aleatorios) mediante el Criterio de Información de Akaike (AIC). Todos los modelos se ajustaron por máxima verosimilitud

(ML, REML = FALSE), condición necesaria para comparar sus AIC al diferir en la estructura de efectos fijos. Se seleccionó el modelo de menor AIC y se reportó el Criterio de Información Bayesiano (BIC) como referencia de parsimonia.

La significancia de los efectos principales (Variedad, Tiempo) y de su interacción se evaluó mediante análisis de varianza de tipo III basado en estadísticos de Wald (Chi-cuadrado), con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Las comparaciones de medias entre niveles de Variedad, Tiempo y de la interacción Variedad × Tiempo se realizaron mediante contrastes de medias marginales estimadas (estimated marginal means, paquete emmeans), utilizando el procedimiento de la diferencia mínima significativa de Fisher (LSD de Fisher, sin ajuste por comparaciones múltiples), y las diferencias se representaron mediante letras compartidas ($p \leq 0.05$).

El cumplimiento de los supuestos de cada modelo se verificó mediante el análisis de residuales simulados con el paquete DHARMa, evaluando homogeneidad de varianza, distribución uniforme de los residuales y ausencia de sobredispersión.

Resultados y discusión

Modelos Lineales Generalizados Mixtos

El modelo con ambos factores fijos, incluyendo su interacción, presentó el mejor ajuste para ambas variables respuesta (Incidencia: AIC = −390.09; Severidad: AIC = 1000.45) y fue el seleccionado como modelo final con base en el AIC. El BIC coincidió en severidad, pero en incidencia favoreció al modelo más parsimonioso M3_VariedadA_TiempoF (BIC = −349.94); se conservó M1_AmbosFijos por permitir evaluar la interacción Variedad × Tiempo, central para el objetivo del estudio (Cuadro 1 y Cuadro 2**).**

Cuadro 1. Comparación de ajuste de los modelos para Incidencia (%) (AIC, BIC, Link)

Modelo	logLik	AIC	BIC	gl
M1_AmbosFijos	211.0458	-390.0916	-330.8311	16
M2_VariedadF_TiempoA	181.6660	-353.3320	-334.8131	5
M3_VariedadA_TiempoF	194.9330	-375.8659	-349.9395	7
M4_AmbosAleatorios	180.1930	-352.3861	-337.5709	4

Fuente: Elaboración propia con datos del estudio.

Cuadro 2. Comparación de ajuste de los modelos para Severidad (%) (AIC, BIC, Link)

Modelo	logLik	AIC	BIC	gl
M1_AmbosFijos	-484.2261	1,000.4523	1,059.7128	16
M2_VariedadF_TiempoA	-517.5245	1,045.0489	1,063.5678	5
M3_VariedadA_TiempoF	-509.8338	1,033.6676	1,059.5941	7
M4_AmbosAleatorios	-520.1719	1,048.3438	1,063.1589	4

Fuente: Elaboración propia con datos del estudio.

El uso de GLMM para el análisis de variables epidemiológicas como la incidencia y la severidad es una práctica cada vez más frecuente en fitopatología, dado que estas variables rara vez cumplen los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza que exige el análisis de varianza clásico (Madden & Ojiambo, 2024). En trabajos enfocados específicamente en el análisis de la incidencia de enfermedades, Piepho (1999) y Madden et al. (2002) emplearon GLMM con distribuciones binomial y beta, respectivamente, para modelar la proporción de individuos enfermos en experimentos con diseño de bloques, incluyendo el tratamiento evaluado (por ejemplo, el fungicida o el genotipo) como efecto fijo y el bloque como efecto aleatorio para capturar la variación no controlada del diseño experimental.

De manera similar, en ensayos de variedades de trigo evaluados a lo largo de varios años y localidades, Laidig et al. (2021) modelaron la severidad de distintas enfermedades foliares mediante modelos mixtos, en los que la variedad y el año se trataron como efectos fijos de interés central para el estudio, mientras que la localidad y sus interacciones se incluyeron

como efectos aleatorios para representar la variación ambiental entre sitios. Un caso aún más cercano al presente estudio es el de Mariño et al. (2026), quienes analizaron la incidencia y severidad de roya en distintas variedades de café en Puerto Rico mediante GLMM ajustados con glmmTMB, empleando distribución binomial para incidencia y beta para severidad, con el cultivar, el año, la temporada y la posición en el dosel como efectos fijos, y un intercepto aleatorio para representar la estructura jerárquica de las mediciones repetidas por rama y hoja.

En el presente trabajo, dado que la evaluación se realizó en un único sitio experimental y el interés se centró explícitamente en comparar el comportamiento de tres variedades específicas a lo largo del tiempo, Variedad y Tiempo se incluyeron como efectos fijos, sin incorporar efectos aleatorios adicionales. Esta decisión es consistente con el criterio señalado por Madden & Ojiambo (2024): un factor debe tratarse como efecto fijo cuando el interés del estudio recae sobre los niveles específicos evaluados, y como efecto aleatorio cuando dichos niveles representan una muestra de una población más amplia sobre la cual se desea generalizar.

Incidencia de roya

El análisis de varianza (Wald Chi-cuadrado, tipo III) mostró que el factor Tiempo tuvo un efecto altamente significativo sobre la incidencia de roya ($\chi^2 = 519.02$; g.l. = 4; $p < 0.0001$), mientras que el factor Variedad no fue significativo por sí solo ($\chi^2 = 2.66$; g.l. = 2; $p = 0.2645$). Sin embargo, la interacción Variedad × Tiempo fue significativa ($\chi^2 = 29.35$; g.l. = 8; $p = 0.0003$), lo que indica que el patrón de incremento de la incidencia a lo largo del tiempo difirió entre las tres variedades evaluadas. Pese a la ausencia de diferencias significativas entre variedades a nivel general, OA mostró la tendencia numérica más alta de incidencia acumulada (Cuadro 3). La incidencia se mantuvo baja y estadísticamente similar entre T1 y T2, incrementó significativamente entre T3 y T4, y alcanzó su máximo en T5, con más del 92% de las plantas afectadas, diferenciándose claramente de los tiempos anteriores (Cuadro 4).

Cuadro 3. Incidencia media (proporción) de roya por variedad de café

Variedad	Incidencia	EE	IC 95%	Grupo
Catuaí	0.5346	0.0198	0.4958 – 0.5731	a

Icatú	0.5363	0.0201	0.4967 – 0.5754	a
Oro Azteca	0.5750	0.0197	0.5360 – 0.6130	a

Fuente: Elaboración propia con datos del estudio. Medias con la misma letra no difieren estadísticamente (LSD de Fisher, $p \leq 0.05$).

Cuadro 4. Incidencia media (proporción) de roya por tiempo de muestreo

Tiempo	Incidencia	EE	IC 95%	Grupo
T2	0.2562	0.0196	0.2197 – 0.2964	a
T1	0.3056	0.0210	0.2660 – 0.3483	a
T3	0.5042	0.0238	0.4577 – 0.5507	b
T4	0.5679	0.0232	0.5220 – 0.6126	b
T5	0.9292	0.0088	0.9099 – 0.9446	c

Fuente: Elaboración propia con datos del estudio.

La interacción muestra que en T3, OA e Icatú se comportaron de forma distinta a Catuaí: OA alcanzó una incidencia significativamente mayor (grupo d) que Catuaí (grupo c) en esa fecha. Mientras que para T5 las tres variedades convergieron en incidencias superiores al 92%, sin diferencias entre ellas (Figura 3).

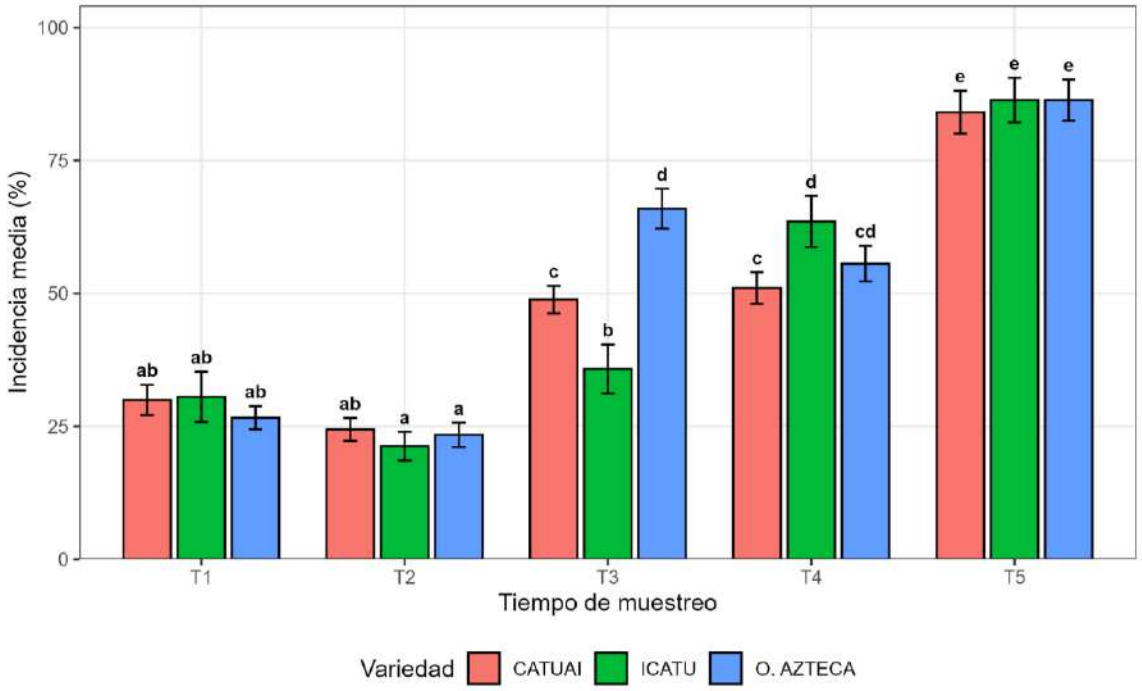


Figura 3. Incidencia media de roya (± error estándar). Letras distintas indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia.*Severidad de roya*

El análisis de varianza mostró efectos significativos tanto de Variedad ($\chi^2 = 11.00$; g.l. = 2; $p = 0.0041$) como de Tiempo ($\chi^2 = 159.50$; g.l. = 4; $p < 0.0001$), así como de su interacción ($\chi^2 = 46.22$; g.l. = 8; $p < 0.0001$). A diferencia de la incidencia, en severidad sí se observó una diferencia clara entre variedades: Oro Azteca presentó una severidad significativamente mayor que Catuaí e Icatú, las cuales no difirieron entre sí (Cuadro 5).

Cuadro 5. Severidad media (%) de roya por variedad de café

Variedad	Severidad	EE	IC 95%	Grupo
Catuaí	1.7019	0.1431	1.4433 – 2.0067	a
Icatú	1.7084	0.1436	1.4489 – 2.0144	a
Oro Azteca	2.3992	0.2017	2.0347 – 2.8290	b

Fuente: Elaboración propia con datos del estudio.

La severidad se mantuvo baja y estadísticamente similar entre T1 y T2 (grupo a), aumentó de forma significativa en T3 y T4, sin diferencias entre estos dos tiempos (grupo b), y alcanzó su valor máximo en T5 (grupo c), con un incremento de más de cuatro veces respecto al inicio del muestreo, evidenciando una progresión sostenida y acelerada de la enfermedad hacia el final del ciclo evaluado (Cuadro 6).

Cuadro 6. Severidad media (%) de roya por tiempo de muestreo

Tiempo	Severidad	EE	IC 95%	Grupo
T2 (jun 2025)	0.9075	0.0985	0.7336 – 1.1227	a
T1 (abr 2025)	0.9666	0.1049	0.7814 – 1.1958	a
T3 (sep 2025)	2.3169	0.2515	1.8730 – 2.8661	b
T4 (dic 2025)	2.9645	0.3217	2.3964 – 3.6672	b
T5 (feb 2026)	4.2265	0.4587	3.4167 – 5.2284	c

Fuente: Elaboración propia con datos del estudio.

La interacción evidencia trayectorias distintas de progreso de la enfermedad: OA mostró el incremento más pronunciado y sostenido de severidad desde T3, alcanzando el valor más alto en T4. Mientras que Icatú, pese a partir con la severidad más baja en T1-T2, mostró el mayor salto hacia T5, superando incluso a OA en el último muestreo (Figura 5).

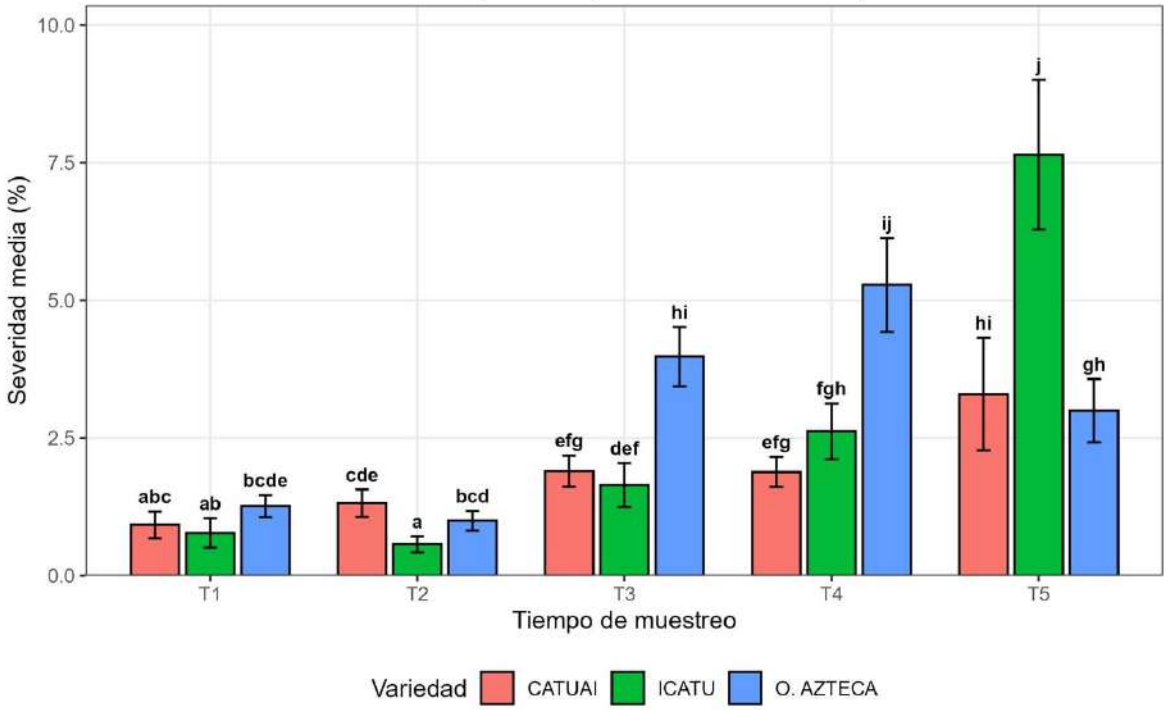


Figura 5. Severidad media de roya (± error estándar). Letras distintas indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$). Fuente: Elaboración propia.

La progresión temporal observada en ambas variables coincide con el patrón epidemiológico descrito previamente para la roya del café en Veracruz. La incidencia y la severidad se mantuvieron bajas en abril y junio (T1-T2), periodo correspondiente al inicio de la temporada de lluvias, y se incrementaron de manera marcada entre septiembre y febrero (T3-T5), lo cual es consistente con lo reportado por Pale-Ezquivel et al. (2023) para esta misma región. Los cuales asociaron el avance de la enfermedad con las condiciones de humedad y temperatura que favorecen la germinación de uredosporas y la infección foliar durante y después del periodo de lluvias. El máximo registrado en T5 (febrero), con una incidencia superior al 92% y la severidad más alta de todo el ciclo, sugiere un efecto acumulativo del inóculo a lo largo del año, además de una mayor susceptibilidad de las hojas de mayor edad hacia el final del ciclo productivo.

Un aspecto relevante de los resultados es la falta de correspondencia entre el comportamiento de la incidencia y el de la severidad respecto al factor Variedad. Mientras que la incidencia no mostró diferencias significativas entre variedades a nivel general y las tres convergieron por encima del 92% en T5, la severidad sí permitió discriminar claramente entre ellas. Este contraste es consistente con la naturaleza estadística de ambas variables. La incidencia es una medida binaria (hoja con o sin roya) cuya varianza depende del nivel de enfermedad alcanzado: es máxima en valores intermedios de la proporción de unidades afectadas y disminuye conforme ésta se aproxima a sus límites (Piepho, 1999; Madden et al., 2002). Así que, bajo alta presión de inóculo tiende a saturarse y pierde capacidad para discriminar entre tratamientos una vez que la enfermedad se ha establecido en la mayoría de las unidades experimentales. La severidad, en cambio, al cuantificar el área foliar afectada, conserva sensibilidad para detectar diferencias en la tasa de colonización del patógeno aun cuando la incidencia ya es generalizada. Seem (1984) señaló que la relación incidencia–severidad solo resulta aplicable mientras ninguna de las dos variables ha alcanzado sus valores máximos, y que la incidencia es mejor predictor durante las fases tempranas de la epidemia, cuando el progreso de la enfermedad depende simultáneamente del incremento de ambas. Para el patosistema *C. arabica–H. vastatrix* en particular, Silva-Acuña et al. (1999) encontraron que la severidad se relaciona con la incidencia mediante un polinomio de segundo orden, cuyo término cuadrático implica que el área foliar afectada se incrementa de forma acelerada precisamente cuando la incidencia se aproxima a su techo. El comportamiento observado en T5 corresponde a esa fase de la curva.

Esta interpretación no contradice a los trabajos que han propuesto sustituir la severidad por la incidencia como criterio práctico de evaluación, por su menor costo y mayor facilidad de aprendizaje para técnicos y productores (Silva-Acuña *et al*., 1999; Julca Otiniano *et al*., 2019), sino que delimita su ámbito de validez: dichas correlaciones se establecieron dentro de rangos intermedios de intensidad de la enfermedad. En el presente estudio, la incidencia fue informativa hasta T4 (56.8%) e incluso detectó diferencias varietales en T3 a través de la interacción, pero dejó de resolverlas al saturarse en T5.

En este sentido, los resultados sugieren que la severidad constituye el descriptor más informativo para diferenciar el comportamiento varietal frente a *H. vastatrix* en condiciones de campo, mientras que la incidencia resulta más útil para caracterizar la velocidad de dispersión inicial de la enfermedad. El uso de una escala diagramática de severidad, como el

Diagrama de Área Estándar (López-Vásquez et al., 2018) empleado en este trabajo, en lugar de un registro binario de incidencia, coincide con desarrollos metodológicos recientes que han validado y refinado escalas diagramáticas para roya del café precisamente porque mejoran la precisión y reproducibilidad de la estimación de severidad frente a evaluaciones sin escala (Figueiredo et al., 2022).

El hallazgo más notable del estudio es que OA, variedad desarrollada específicamente mediante mejoramiento genético para conferir resistencia a la roya, presentó la severidad promedio más alta de las tres variedades evaluadas, y que Icatú una variedad introgresada con genes de resistencia que se obtuvo a partir del cruce de un híbrido, *C. canephora* × la variedad Borbón de *C. arabica*, con la variedad Mundo Novo, mostró el incremento más pronunciado hacia T5, superando incluso a OA en el último muestreo. Este patrón resulta contraintuitivo si se asume que la resistencia genética de ambos materiales debería traducirse en una menor severidad respecto a Catuaí, variedad tradicionalmente susceptible. Sin embargo, es coherente con lo planteado en la introducción de este trabajo: la resistencia varietal a la roya no es un atributo fijo, sino que puede erosionarse en el tiempo por la presión de selección que ejerce el patógeno sobre la planta hospedante.

Evidencia reciente respalda esta interpretación, por ejemplo, en Brasil, la mayoría de los cultivares del grupo Icatú liberados comercialmente ya han tenido su resistencia cualitativa suplantada por razas de *H. vastatrix* presentes en campo (Sera et al., 2022); en Centroamérica, estudios moleculares recientes han identificado una posible ruptura de la resistencia en el grupo genético Catimor, al que pertenece OA (Brenes et al., 2025); y en Perú, la caracterización de aislados de campo detectó nuevas razas fisiológicas capaces de infectar variedades derivadas del Híbrido de Timor, el mismo origen genético de estos materiales (Julca-Otiniano et al., 2024).

Un patrón muy similar fue reportado recientemente en Puerto Rico, donde los cultivares Limaní, Marsellesa y Obatã, clasificados como resistentes y portadores de genes de resistencia (SH6-SH9) derivados igualmente del Híbrido de Timor, presentaron en promedio la mitad de la incidencia y severidad de roya que los cultivares susceptibles, pero de ninguna manera estuvieron libres de la enfermedad, y siguieron el mismo patrón estacional que estos últimos, lo que llevó a los autores a concluir que el genotipo por sí solo no constituye una protección completa frente a la roya del café (Mariño et al., 2026).

La crisis de la roya registrada en Centroamérica y Colombia entre 2008 y 2013 documentó un fenómeno similar a mayor escala regional (Avelino et al., 2015). De confirmarse esta hipótesis, los resultados aquí obtenidos podrían constituir una señal temprana de la ruptura de la resistencia en OA e Icatú, por lo menos en las plantaciones del Sitio Experimental Teocelo, con implicaciones relevantes para el manejo de estas variedades en la región.

No obstante, esta interpretación debe tomarse con cautela ya que el presente estudio correspondió a un solo ciclo de evaluación, sin caracterización de las razas fisiológicas de *H. vastatrix* presentes, por lo que no es posible descartar que las diferencias observadas respondan, al menos parcialmente, a factores agronómicos o microclimáticos propios de cada variedad, tales como el hábito de crecimiento, la densidad de follaje o el manejo de sombra, que modifican las condiciones de humedad relativa dentro del dosel y, con ello, la presión de infección local (Sera et al., 2022).

Esta cautela se refuerza con evidencia reciente que muestra interacciones genotipo × ambiente significativas en la resistencia a roya entre distintos cultivares de café, lo que indica que el comportamiento de una variedad frente a *H. vastatrix* puede variar considerablemente entre sitios (Lima et al., 2025). Se recomienda que estudios posteriores incluyan la tipificación de razas del patógeno y el seguimiento del comportamiento varietal a lo largo de varios ciclos productivos y en múltiples localidades, con el fin de distinguir entre erosión genética de la resistencia y efectos ambientales o de manejo.

Conclusiones

El tiempo de muestreo fue el factor que más influyó tanto en la incidencia como en la severidad de la roya, con un incremento marcado a partir de septiembre y un máximo en febrero (T5), lo que evidencia una progresión estacional definida de la enfermedad en el Sitio Experimental Teocelo.

La incidencia no diferenció el comportamiento de las variedades a nivel general y se saturó en valores superiores al 92% al final del ciclo, mientras que la severidad sí mostró diferencias significativas entre variedades, lo que la posiciona como el descriptor más sensible para evaluar la respuesta varietal a *H. vastatrix* en condiciones de campo.

Contrario a lo esperado, OA e Icatú, variedades concebidas con resistencia genética a la roya, no mostraron un comportamiento más favorable que Catuaí, OA presentó la severidad

promedio más alta y Icatú registró el mayor incremento hacia el final del ciclo, lo que sugiere una posible disminución en la eficacia de la resistencia genética bajo las condiciones evaluadas.

Estos resultados resaltan la necesidad de dar seguimiento continuo al comportamiento de las variedades resistentes liberadas para la caficultura mexicana, así como de caracterizar las razas de *H. vastatrix* presentes en campo, con el fin de anticipar posibles pérdidas de eficacia de la resistencia genética disponible.

Finalmente, el uso de modelos lineales generalizados mixtos (GLMM) resultó adecuado para el análisis de la incidencia y la severidad de roya, al permitir modelar directamente la naturaleza no normal de estas variables (distribuciones Beta y Gamma) sin recurrir a transformaciones que distorsionan su interpretación biológica. La selección del modelo con Variedad y Tiempo como efectos fijos, respaldada por el Criterio de Información de Akaike, resultó consistente con el enfoque empleado en otros estudios epidemiológicos y de ensayos varietales, y permitió evaluar de forma directa la interacción Variedad × Tiempo, central para los objetivos de este trabajo.

Literatura citada

Adepoju, A. F., Adenuga, O. O., Mapayi, E. F., Olaniyi, O. O., & Adepoju, F. A. (2017). Coffee: Botany, distribution, diversity, chemical composition and its management. Journal of Agriculture and Veterinary Science, 10(7), 57–62.

Avelino, J., Allinne, C., Cerda, R., Willocquet, L., & Savary, S. (2018). Multiple-disease system in coffee: From crop loss assessment to sustainable management. Annual Review of Phytopathology, 56, 611–635. https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050117

Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Tarqui, G., & Labrador, J. (2015). The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): Impacts, plausible causes and proposed solutions. Food Security, 7(2), 303–321. https://doi.org/10.1007/s12571-015-0446-y

Brenes, E. G., Zambolim, L., de Almeida, D. P., Ribeiro, P. M., Mariz, B. L., & Caixeta, E. T. (2025). Assisted stacking of fungal disease resistance genes in Central American coffee cultivars. Agronomy, 15(1), 230. https://doi.org/10.3390/agronomy15010230

Figueiredo, Y. F., Oliveira, J. M., Almeida, K. A., de Fátima Pereira, P., Pedroso, L. A., de Resende Faria Guimarães, M., Costa, M. M., & Pozza, E. A. (2022). Coffee leaf rust assessment: Comparison and validation of diagrammatic scales for *Coffea arabica.* European Journal of Plant Pathology, 164(3), 411–427. https://doi.org/10.1007/s10658-022-02570-2

Julca-Otiniano, A., Alvarado-Huamán, L., Castro-Cepero, V., Borjas-Ventura, R., Gómez-Pando, L., Pereira, A. P., Nielen, S., Ingelbrecht, I., Silva, M. do C., & Várzea, V. (2024). New races of *Hemileia vastatrix* detected in Peruvian coffee fields. Agronomy, 14(8), 1811. https://doi.org/10.3390/agronomy14081811

Julca Otiniano, A., Borjas Ventura, R., Alvarado Huamán, L., Julca Vera, N., Castro Cepero, V., & Bello Amez, S. (2019). Relación entre la incidencia y la severidad de la roya del café (Hemileia vastatrix) en San Ramón, Chanchamayo, Perú. Journal of Science and Research, 4(4), 1–9. https://doi.org/10.5281/zenodo.3477556

Laidig, F., Feike, T., Hadasch, S., Rentel, D., Klocke, B., Miedaner, T., & Piepho, H. P. (2021). Breeding progress of disease resistance and impact of disease severity under natural infections in winter wheat variety trials. Theoretical and Applied Genetics, 134(5), 1281-1302. https://doi.org/10.1007/s00122-020-03728-4

Lima, A. F., dos Santos Botelho, D. M., Guerra-Guimarães, L., Andrade, V. T., de Resende, M. L. V., de Lima Santos, M., & de Rezende Abrahão, J. C. (2025). Evaluating coffee genotypes for resistance to coffee leaf rust in Brazil. Tropical Plant Pathology, 50(1), 2. https://doi.org/10.1007/s40858-024-00688-8

López-Vásquez, J. M., Marín, G., Gaitán, A., & Ángel, C. (2018). Diagrama de área estándar para la estimación visual de severidad de roya del cafeto. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32117.52960

Madden, L. V., & Ojiambo, P. S. (2024). The value of generalized linear mixed models for data analysis in the plant sciences. Frontiers in Horticulture, 3, Article 1423462. https://doi.org/10.3389/fhort.2024.1423462

Madden, L. V., Turechek, W. W., & Nita, M. (2002). Evaluation of generalized linear mixed models for analyzing disease incidence data obtained in designed experiments. Plant Disease, 86(3), 316-325. https://doi.org/10.1094/PDIS.2002.86.3.316

Mariño, Y. A., Buitrago, D. P., Serrato-Díaz, L. M., Almonte-Javier, E., Negrón Moreno, S. E., & Bayman, P. (2026). Dynamics of coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) in Puerto Rico: Associations with season, cultivar, altitude, and hyperparasites. Frontiers in Plant Science, 17, Article 1768440. https://doi.org/10.3389/fpls.2026.1768440.

Pale-Ezquivel, I., Lagunes, R. M., del Rosario Pineda-López, M., Alarcón-Gutiérrez, E., & Sánchez-Velásquez, L. R. (2023). Temporal progress of coffee leaf rust and environmental conditions affecting severity in Veracruz State, Mexico. Coffee Science, 18, e182047. variedadescaféhttps://doi.org/10.25186/.v18i.2047.

Piepho, H. P. (1999). Analysing disease incidence data from designed experiments by generalized linear mixed models. Plant Pathology, 48(5), 668-674. https://doi.org/10.1046/j.1365-3059.1999.00383.x

Rhiney, K., Guido, Z., Knudson, C., Avelino, J., Bacon, C. M., Leclerc, G., & Bebber, D. P. (2021). Epidemics and the future of coffee production. Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(16), e2023212118. https://doi.org/10.1073/pnas.2023212118

Seem, R. C. (1984). Disease incidence and severity relationships. Annual Review of Phytopathology, 22, 133–150. https://doi.org/10.1146/annurev.py.22.090184.001025

Sera, G. H., de Carvalho, C. H. S., de Rezende Abrahão, J. C., Pozza, E. A., Matiello, J. B., de Almeida, S. R., Bartelega, L., & dos Santos Botelho, D. M. (2022). Coffee leaf rust in Brazil: Historical events, current situation, and control measures. Agronomy, 12(2), 496. https://doi.org/10.3390/agronomy12020496

Silva-Acuña, R., Maffia, L. A., Zambolim, L., & Berger, R. D. (1999). Incidence-severity relationships in the pathosystem Coffea arabica–Hemileia vastatrix. Plant Disease, 83(2), 186–188. https://doi.org/10.1094/PDIS.1999.83.2.186

Evaluación de la actividad antifúngica del extracto etanólico de *Parthenium hysterophorus* L. contra *Fusarium oxysporum*

Jiménez García Lizbeth[23], Vicente Flores Macario*, Cenobio Galindo Antonio de Jesús[24], Hernández Soto Iridiam

Resumen

En la agricultura, el uso intensivo de fungicidas sintéticos para controlar hongos fitopatógenos ha causado daños al medio ambiente y a la salud, impulsando la búsqueda de alternativas de origen vegetal. En este sentido, el objetivo del presente estudio fue cuantificar los compuestos fenólicos, flavonoides y la capacidad antioxidante del extracto etanólico de *Parthenium hysterophorus* L. a dos concentraciones contra *Fusarium oxysporum*. El material vegetal seco y molido se sometió a maceración etanólica durante 15 días en una relación 1:10 (m/v). Los fenoles y flavonoides se determinaron por métodos espectrofotométricos, mientras que la capacidad antioxidante se evaluó mediante DPPH y ABTS. La evaluación antifúngica se realizó en medios de PDA con 5, y 15 % (v/v) de extracto y se utilizó Captan como control positivo. El extracto presentó 415.46 ± 0.46 mg EAG/100 g de fenoles totales, 110.10 ± 0.22 mg EQ/100 g de flavonoides y valores de 245.72 ± 3.24 y 2431.48 ± 29.43 mg EAA/100 g mediante DPPH y ABTS, respectivamente. El crecimiento micelial disminuyó conforme se aumentó la concentración; el tratamiento al 15 % impidió el crecimiento visible durante siete días. Estos resultados indican que el extracto etanólico posee potenciales aplicaciones antifúngicas.

Palabras clave: *Biofungicidas, actividad antifúngica, Parthenium hysterophorus L. & Fusarium oxysporum.*

[23] Universidad Tecnológica de Xicotepec de Juárez, Av. Universidad Tecnológica, Área Agroindustrial-Alimentaria, Xicotepec de Juárez 73080, Puebla, México; lizjimg2830@gmail.com, macario.vicenteflores@utxicotepec.edu.mx (autor de correspondencia)
[24] Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Agropecuarias, Tulancingo de Bravo, 43600, Hidalgo, México; antonio_cenobio@uaeh.edu.mx; iridiam_hernandez@uaeh.edu.mx

Abstract

In agriculture, the intensive use of synthetic fungicides to control phytopathogenic fungi has caused environmental and health-related damage, prompting the search for plant-based alternatives. In this context, the objective of the present study was to quantify the phenolic compounds, flavonoids, and antioxidant capacity of the ethanolic extract of Parthenium hysterophorus L. at two concentrations against Fusarium oxysporum. The dried and ground plant material was subjected to ethanolic maceration for 15 days at a 1:10 (w/v) ratio. Phenolic compounds and flavonoids were determined using spectrophotometric methods, while antioxidant capacity was evaluated by DPPH and ABTS assays. The antifungal evaluation was performed on PDA media containing 5 and 15% (v/v) extract, with Captan used as a positive control. The extract contained 415.46 ± 0.46 mg GAE/100 g of total phenolic compounds and 110.10 ± 0.22 mg QE/100 g of flavonoids, with antioxidant capacity values of 245.72 ± 3.24 and 2431.48 ± 29.43 mg AAE/100 g determined by DPPH and ABTS, respectively. Mycelial growth decreased as the extract concentration increased; the 15% treatment prevented visible growth for seven days.

These results indicate that the ethanolic extract has potential antifungal applications.

Keywords: *Biofungicides, antifungal activity, Parthenium hysterophorus L., Fusarium oxysporum.*

Introducción

El uso intensivo de fungicidas sintéticos en la agricultura moderna ha generado preocupación debido a sus efectos negativos sobre el suelo, particularmente en los microorganismos que sustentan la fertilidad, aunque estos compuestos son eficaces para el control de hongos fitopatógenos, diversos estudios recientes han demostrado que su aplicación continua altera significativamente la dinámica biológica del suelo, dichos compuestos son aplicados contra hongos fitopatógenos.

Por lo tanto, *Fusarium oxysporum* es un complejo de hongos fitopatógenos asociado con marchitez vascular y pérdidas productivas en numerosos cultivos, su manejo depende con frecuencia de fungicidas sintéticos; sin embargo, el uso reiterado de estos insumos puede alterar el equilibrio ecológico, por ello, los extractos vegetales se investigan como fuentes de compuestos fungistáticos o fungicidas potencialmente compatibles con estrategias de manejo integrado (Jorgensen et al., 2024).

Los extractos vegetales constituyen mezclas complejas de fenoles, flavonoides, terpenoides y otros metabolitos secundarios, en los cuales su actividad depende de la especie vegetal, el solvente, método de extracción, la concentración y susceptibilidad del microorganismo. En

ensayos *in vitro*, los extractos de diferentes especies vegetales (*Bidens pilosa*, *Amaranthus spinosus* y *Chenopodium álbum*) han reducido el crecimiento de hongos fitopatógenos (*Fusarium oxysporum*, *Alternaria alternata*, *Botrytis cinerea* y *Rhizoctonia solani*), de manera dependiente de la concentración, aunque la respuesta no puede extrapolarse directamente a condiciones de campo (Cárdenas-Laverde et al., 2021; Kursa et al., 2022).

En este sentido, *Parthenium hysterophorus* L. es una especie arvense ampliamente distribuida en ecosistemas tropicales y subtropicales secos o subhúmedos, colonizando con gran éxito áreas alteradas, potreros, orillas de caminos, sabanas y terrenos agrícolas en regiones cálidas, aunque su carácter invasivo y sus posibles efectos alergénicos exigen un manejo cuidadoso, el aprovechamiento controlado de su biomasa podría representar una vía para obtener metabolitos con actividad biológica (Kaur et al., 2014). Dentro de algunas técnicas, la maceración con etanol permite recuperar compuestos de polaridad intermedia y constituye un procedimiento sencillo para evaluar preliminarmente este potencial.

En este contexto, el objetivo del estudio fue cuantificar los compuestos fenólicos, flavonoides y la capacidad antioxidante del extracto etanólico de *P. hysterophorus* L. y a través de una evaluación *in vitro* evidenciar el efecto sobre el crecimiento micelial de *F. oxysporum* a concentraciones de 5, y 15 % (v/v), se planteó la hipótesis de que el incremento de la concentración del extracto reduciría el crecimiento micelial del fitopatógeno.

Materiales y Métodos

Lugar y periodo de estudio

La investigación se realizó entre enero y abril de 2026 en las instalaciones de la Universidad Tecnológica de Xicotepec de Juárez y en colaboración del Laboratorio de Aprovechamiento Agroalimentario Integral del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Hidalgo, México.

Ubicación y material vegetal

Se recolectaron tallos y hojas de escoba amarga (*Parthenium hysterophorus* L.) en el municipio de Venustiano Carranza, Puebla, México (coordenadas 20°30′19″N 97°40 ′08″O), la identificación taxonómica de la especie se realizó con base en caracteres morfológicos utilizando la clave de Villaseñor (2018). El material vegetal se transportó en bolsas de polietileno, se lavó y se mantuvo a la sombra en un espacio ventilado a 25°C, aproximadamente durante 2 días. Posteriormente, se redujo de tamaño de 5 cm de largo y se colocaron en un deshidratador de charolas con aire caliente por convección a una temperatura de 55 °C por 24 h.

Obtención del extracto etanólico

El material seco se mezcló con etanol (96°) en una relación 1:10 (m/v; 10 g por 100 mL) y se mantuvo en oscuridad durante 15 días a temperatura ambiente (20-25°C). A la mezcla se le fue dando una agitación lenta manualmente cada 12 h. Al finalizar la maceración, el extracto se filtró y el solvente se eliminó a 79 °C y 32 RPM en un evaporador rotatorio HAN SHIN HS-3001 (Corea del Sur). El concentrado se almacenó en frascos ámbar y refrigeración (4 °C) hasta su análisis.

Cuantificación de compuestos fenólicos y flavonoides

Los fenoles totales se determinaron mediante el reactivo de Folin–Ciocalteu. Se mezclaron 0.5 mL de extracto con 2.5 mL de reactivo diluido 1:10 y, después de 5 min, se añadieron 2.0 mL de Na_2CO_3 al 2 % (m/v). La mezcla reaccionó durante 2 h en oscuridad y la absorbancia se registró a 760 nm. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico (EAG)/100 g de muestra (Singleton et al., 1999).

El contenido de flavonoides se cuantificó mediante el método colorimétrico con $AlCl_3$. Se mezclaron 2.0 mL de extracto con 2.0 mL de $AlCl_3$ al 2 % (m/v) en metanol; después de 10 min en oscuridad se midió la absorbancia a 415 nm. Los resultados se expresaron como mg equivalentes de quercetina (EQ)/100 g de muestra.

Capacidad antioxidante

Para el ensayo ABTS, el radical se generó con ABTS 7 mM y persulfato de potasio 245 mM, y se ajustó con metanol al 20 % hasta una absorbancia de 0.700 ± 0.002 a 734 nm. Se mezclaron 100 µL de extracto con 2.0 mL del radical y se registró la absorbancia después de 6 min en oscuridad (Re et al., 1999).

Para DPPH, se preparó una solución 0.2 mM y se mantuvo en agitación durante 2 h en oscuridad. El radical se ajustó con metanol al 80 % hasta una absorbancia de 0.700 ± 0.002 a 515 nm. Se mezclaron 2.5 mL de extracto diluido con 0.5 mL de DPPH; la lectura se efectuó después de 30 min (Brand-Williams et al., 1995). La capacidad de neutralización se calculó como:

$$Inhibición\ (\%) = \left[\frac{(Acontrol - Amuestra)}{AControl} x100\right] (1)$$

Los resultados de DPPH y ABTS se expresaron como mg equivalentes de ácido ascórbico (EAA)/100 g de muestra. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado y se reportaron como media ± desviación estándar utilizando la ecuación de la recta:

$$y = mx + b\ (2)$$

Evaluación de la actividad antifúngica

El agar papa dextrosa (PDA; TM Media, Colombia) se preparó de acuerdo con las indicaciones del fabricante y se esterilizó a 121 °C y 15 psi durante 20 min. En condiciones asépticas, el medio se suplementó con extracto hasta obtener concentraciones finales de 5, y 15 % (v/v). Se incluyeron cinco repeticiones con Captan al 10% como producto comercial en control positivo. Cada placa contuvo 20 mL de medio.

De un cultivo activo de *Fusarium oxysporum* se obtuvieron discos de 7.5 mm de diámetro tomados del borde de la colonia, un disco se colocó en el centro de cada placa, con el micelio en contacto con el medio, las placas se sellaron e incubaron a 25 °C durante siete días, el diámetro de la colonia se midió diariamente en dos direcciones perpendiculares y se calculó el promedio.

La inhibición del crecimiento micelial al séptimo día se calculó mediante:

$$Inhibición\ micelial\ (\%) = \left[\frac{(Dc-Dt)}{Dc} x100\right] \quad (3)$$

donde Dc es el diámetro promedio de la colonia en el control negativo y Dt el diámetro promedio en el tratamiento.

Diseño experimental

Se empleó un diseño completamente al azar con 3 tratamientos y cinco repeticiones por tratamiento; cada placa de Petri constituyó una unidad experimental (Cuadro 1). Para la respuesta del día 7 se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas y se realizó un análisis de varianza de una vía. Las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con $\alpha = 0.05$. Los análisis se efectuaron en InfoStat versión 5.13.1.

Cuadro 1. Tratamientos *Parthenium hysterophorus L.* contra *Fusarium oxysporum*

Código	Medio	Concentración de extracto (% v/v)	Repeticiones
CP	PDA + Captan	0	5
E5	PDA + Extracto	5	5
E15	PDA + Extracto	15	5

Nota: CP (Canpan + PDA), E5 (Extracto al 5%) y E15 (Extracto al 15%).

Cuadro 2. Comparación de medias

Tratamiento	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
E5	0.00a	19.94a	26.15a	32.33a	37.01a	41.54a	45.33a
E15	0.00a	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b
CP	0.00a	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b	0.00b

Nota: CP (Canpan + PDA), E5 (Extracto al 5%) y E15 (Extracto al 15%).

Resultados y Discusión

Compuestos bioactivos y capacidad antioxidante

Conforme a los resultados obtenidos en la determinación de compuestos bioactivos y capacidad antioxidante, se presentó la dilución 1:100 ya que permitió obtener absorbancias dentro del intervalo de trabajo de los métodos espectrofotométricos, de modo que en el cuadro 3 se presentan los resultados obtenidos, los cuales confirman que mediante la extracción aplicada se logró recuperar sus metabolitos que son capaces de participar en reacciones de transferencia de electrones o átomos de hidrógeno, al comparar los resultados con la curva de calibración, por consiguiente la capacidad antioxidante del extracto etanólico de *Parthenium hysterophorus* L fue elevada, destacando el valor obtenido mediante ABTS (2431.48 ± 29.43 mg EAA/100 g), mientras que el contenido de flavonoides presentó el menor valor (110.10 ± 0.22 mg EQ/100 g), esta respuesta sugiere que la actividad antioxidante del extracto no depende exclusivamente de la concentración de flavonoides, sino de la acción conjunta de diferentes metabolitos con capacidad reductora y captadora de radicales libres. Estudios recientes han demostrado que *P. hysterophorus* contiene una diversidad de compuestos fenólicos y flavonoides asociados con una importante actividad antioxidante; Ahmed et al. (2024) observaron una relación entre la actividad antioxidante y la presencia de estos metabolitos en extractos de la especie.

La capacidad antioxidante evaluada con las determinaciones espectrofométricas DPPH y ABTS mostraron una reacción positiva, mayormente elevada en la determinación de ABTS, de este modo se comprueba que los constituyentes de la muestra reducen al radical estable y que los compuestos principales son polares debido a que los glicosilados y ácidos fenólicos reaccionan mejor con ABTS, por lo que se demuestra el potencial del extracto con capacidad antioxidante (Sagar et al., 2024).

En el cuadro 2 se muestran los resultados de la comparación de medias que indican que no se observaron diferencias entre tratamientos durante el día 1, debido a que todos presentaron

un valor de 0.00, a partir del día 2, E5 presentó valores significativamente mayores que E15 y CP ($p < 0.05$). Esta diferencia se mantuvo durante todo el periodo experimental, con un incremento progresivo de la media de E5 de 19.94 en el día 2 a 45.33 en el día 7. En contraste, E15 y CP mantuvieron valores de 0.00 durante todo el periodo evaluado y, por lo tanto, no presentaron diferencias significativas entre sí.

De acuerdo a los resultados obtenidos se demuestra que los extractos vegetales son análogos con los de un producto comercial que deriva de compuestos sintéticos y que en su uso constante ocasionan más daños al ambiente, por esta razón la planta de *Parthenium hysterophorus* L. promete ser un potencial material vegetal para realizar extracciones de sus principales metabolitos incorporando técnicas más sofisticadas que eleven la concentración de sus compuestos e incluso aislar los compuestos más activos para su uso en la elaboración de productos de manejo agrícola.

Cuadro 3. Cuantificación de metabolitos

Determinación	
Fenoles totales (mg EAG/100 g)	422.11 ± 5.87
Flavonoides (mg EQ/100 g)	110.92 ± 0.93
DPPH (mg EAA/100 g)	191.85 ± 19.75
ABTS (mg EAA/100 g)	2228.78 ± 123.28

EAG: equivalentes de ácido gálico; EQ: equivalentes de quercetina; EAA: equivalentes de ácido ascórbico. Fuente: elaboración propia

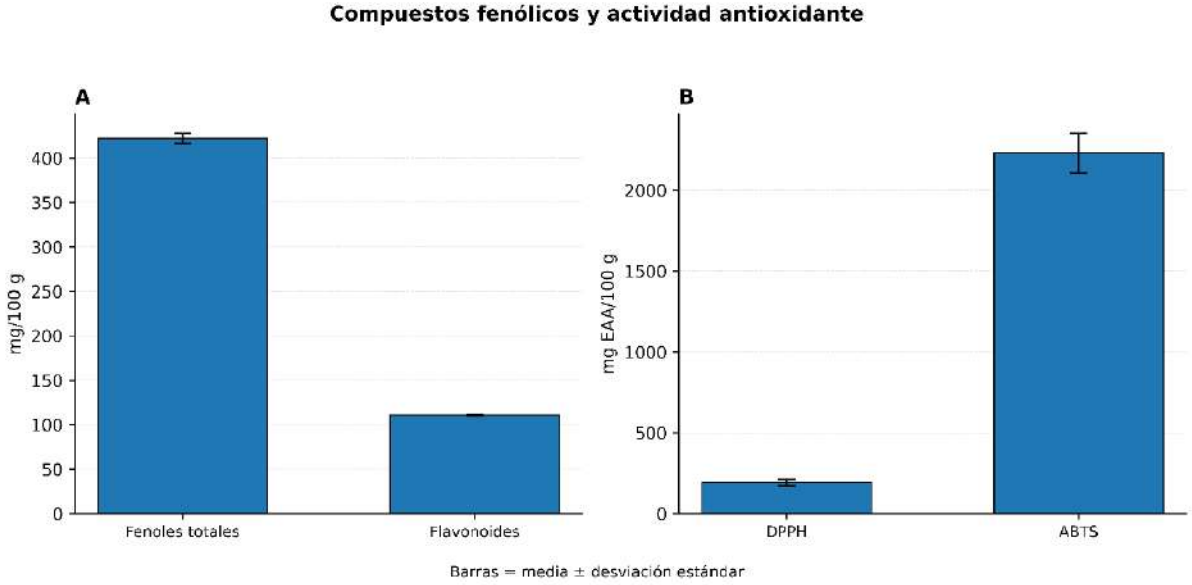


Figura 1. Contenido de compuestos fenólicos y actividad antioxidante del extracto. (A) Fenoles totales y flavonoides; (B) actividad antioxidante determinada mediante los ensayos DPPH y ABTS. Los valores se expresan como media ± desviación estándar.

Efecto sobre el crecimiento micelial

El crecimiento de *F. oxysporum* mostró una respuesta dependiente de la concentración, en el tratamiento E5 el crecimiento visible inició a partir del segundo día lo que indica una inhibición parcial y limitada en esta concentración, en E15 no se observó crecimiento durante los siete días de evaluación lo que sugiere una inhibición total del hongo bajo estas condiciones experimentales.

Este resultado indica que los metabolitos presentes en esta especie, especialmente compuestos fenólicos y flavonoides, poseen actividad antifúngica inhibiendo el crecimiento de micelio en la concentración del 15% (figura 1), lo que sugiere que, aunque posee compuestos bioactivos con efecto antifúngico, su eficacia depende de una mayor concentración para alcanzar resultados comparables.

Este resultado se relaciona con lo reportado por estudios recientes, por ejemplo, Cenobio-Galindo et al. (2024) señalaron que extractos vegetales ricos en compuestos fenólicos y flavonoides pueden inhibir significativamente el crecimiento de *Fusarium oxysporum*, especialmente a concentraciones elevadas, debido a su capacidad para alterar la membrana celular y generar estrés oxidativo en el patógeno, de igual manera, Abd-ElGawad et al. (2024)

demostraron que extractos de plantas con compuestos bioactivos presentan una inhibición dependiente de la concentración, donde dosis más altas generan efectos fungicidas más marcados.

En conjunto, el resultado obtenido demuestra que *Parthenium hysterophorus L*. posee potencial como agente antifúngico natural, asimismo, se confirma que la concentración del extracto y el método de extracción son factores determinantes en la eficacia antifúngica, lo que resalta la importancia de optimizar estas variables para el desarrollo de biofungicidas eficientes y sostenibles.

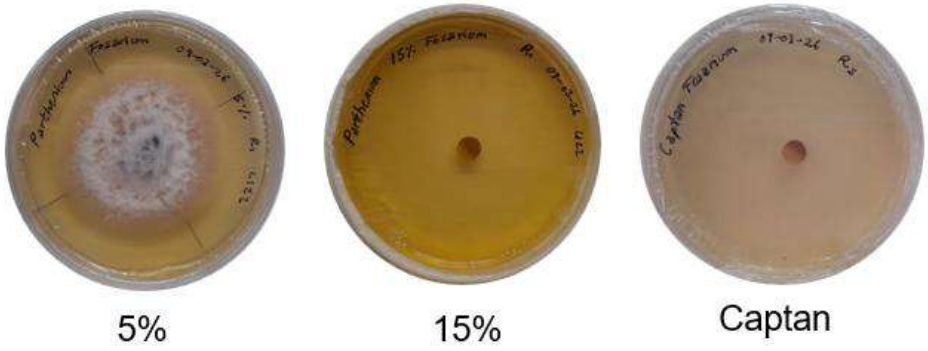


Figura 1. Crecimiento de *Fusarium oxysporum* en PDA suplementado con 5 y 15 % de extracto etanólico de *Parthenium hysterophorus* L., control positivo con Captan.

Fuente: fotografía propia.

La menor expansión de la colonia conforme aumentó la concentración concuerda con el patrón dosis–respuesta descrita para otros extractos botánicos frente a *Fusarium spp*. (Yousafi et al., 2022). La ausencia de crecimiento visible en E15 evidencia un efecto fúngico bajo las condiciones del ensayo, por lo que, a mayor concentración incorpora una cantidad superior de sólidos extraíbles y, potencialmente, de metabolitos capaces de modificar la permeabilidad de membranas o interferir en procesos celulares,

Evaluar el porcentaje de inhibición

Los resultados evidenciaron que el extracto de *Parthenium hysterophorus L*, mostró un efecto inhibitorio notable al 15%, este comportamiento confirma un efecto dosis-dependiente, donde el incremento en la concentración del extracto aumenta la cantidad de metabolitos secundarios disponibles, lo que intensifica la acción antifúngica, este patrón ha sido reportado en diversos estudios, donde se establece que la eficacia de los extractos vegetales depende directamente de la concentración de compuestos activos presentes.

De tal manera que *Parthenium hysterophorus* L, contiene principalmente compuestos fenólicos, cuya actividad antifúngica, aunque efectiva, puede requerir concentraciones más elevadas para alcanzar un efecto comparable, debido a que estos compuestos pueden inducir estrés oxidativo.

Al comparar los resultados con estudios similares, se observa una clara coincidencia en el comportamiento antifúngico, Medeiros et al., (2021) encontraron que extractos botánicos presentan una relación directa entre concentración y porcentaje de inhibición, destacando que los tratamientos más concentrados generan un efecto más marcado, lo cual refuerza el patrón observado en el presente estudio.

Conclusiones

El extracto etanólico de *Parthenium hysterophorus* L. presentó compuestos fenólicos, flavonoides y capacidad antioxidante, además de reducir el crecimiento micelial de *Fusarium oxysporum* de manera dependiente de la concentración. El tratamiento al 15 % impidió el crecimiento visible durante siete días y fue el de mayor potencial fúngico bajo las condiciones evaluadas. Estos hallazgos sustentan el aprovechamiento de la biomasa de esta especie como fuente de compuestos de interés agrícola. Sin embargo, antes de proponer su utilización como biofungicida se requieren ensayos de recuperación micelial, fitotoxicidad, estabilidad y eficacia en plantas.

Literatura citada

Abd-ElGawad, A. M., Elshamy, A. I., El Gendy, A. N. G., & Assaeed, A. M. (2024). Chemical composition and biological activities of essential oils with antifungal potential. Plants, 13(2), 215. https://doi.org/10.3390/plants13020215

Ahmed, M., Javeed, A., Sikandar, A., Ji, M., Bai, X., & Gu, Z. (2024). Antioxidant, insecticidal activity and chemical profiling of flower's extract of Parthenium weed (Parthenium hysterophorus L.). PLOS ONE, 19(6), e0296321. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296321

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

Cárdenas-Laverde, D., Barbosa-Cornelio, R., & Coy-Barrera, E. (2021). Antifungal activity against Fusarium oxysporum of botanical end-products: An integration of chemical composition and antifungal activity datasets to identify antifungal bioactives. Plants, 10(12), 2563. https://doi.org/10.3390/plants10122563

Cenobio-Galindo, A. J., Hernández-Fuentes, A. D., González-Lemus, U., Zaldívar- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2013). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Ultrasonics Sonochemistry, 34, 540–560. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035

Jorgensen, L. N., Matzen, N., Hansen, J. G., & Semaskiene, R. (2024). Fungicide resistance in crop pathogens: Status and perspectives. Pest Management Science, 80(2), 456–468. https://doi.org/10.1002/ps.7812

Kaur, M., Aggarwal, N. K., Kumar, V., & Dhiman, R. (2014). Effects and management of Parthenium hysterophorus: A weed of global significance. International Scholarly Research Notices, 2014, 368647. https://doi.org/10.1155/2014/368647

Kursa, W., Jamiołkowska, A., Wyrostek, J., & Kowalski, R. (2022). Antifungal effect of plant extracts on the growth of the cereal pathogen Fusarium spp.—An in vitro study. Agronomy, 12(12), 3204. https://doi.org/10.3390/agronomy12123204

Medeiros, C. A. C., Pinto, Â. de V., & Pereira, F. de O. (2021). Evaluating the antifungal activity of α-bisabolol in association with NaCl on Fusarium oxysporum in maize grains. Current Microbiology, 78(2), 604–610. https://doi.org/10.1007/s00284-020-02313-8

Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radical Biology and Medicine, 26(9–10), 1231–1237. https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3

Sagar, N. A., Pareek, S., Sharma, S., Yahia, E. M., & Lobo, M. G. (2024). Fruit and vegetable waste: Bioactive compounds and their extraction techniques. Food Chemistry, 430, 137032. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137032

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

Villaseñor, J.L. (2018). Diversidad y distribución de la familia Asteraceae en México. Botanial Sciences, 96, 322-358. https://doi.org/10.17129/botsci.1872

Yousafi, Q., et al. (2022). Identification of novel fungicidal molecules against Fusarium oxysporum from plant essential oils. BioMed Research International, 2022, 5347224. https://doi.org/10.1155/2022/5347224

Evaluación de productos comerciales y alternativos contra el tizon tardio (*Phytophthora infestans*) en el cultivo de jitomate

Santiago-Elena, Eduardo[25]; Martínez-Cruz, Julieta[26]; Zamora-Macorra, Erika Janet; Elizalde-Gaytan, Karla G.

Resumen

El cultivo de jitomate es muy susceptible a diversos problemas fitosanitarios, siendo el tizón tardío (*Phytophthora infestans*), afectando entre 40 y 70% de rendimiento, por lo que el objetivo de esta investigación fue evaluar la efectividad de diversos ingredientes activos contra *P. infestans* a campo abierto en el cultivo de jitomate var. Rio Grande. El experimento se realizó en Huitzo, Oaxaca. Se utilizo un diseño experimental en bloques completamente al azar, cada tratamiento con 6 repeticiones. Los tratamientos consistieron en aplicaciones cada 8 dias, de Cyr Mega (*Larrea tridentata* 95.0%) a 2.1 $mL.L^{-1}$; Cu-Back (Gluconato de cobre 25.0%) a 1.5 $mL.L^{-1}$; Coraza 720S (Clorotalonil 70%) a 1.0 $mL.L^{-1}$; Programic Mix-Top (Bicarbonato de potasio 85.0%) a 2.0 $mL.L^{-1}$; Curzate (Cymozanil 8%+Mancozeb 70%) a 1.20 $g.L^{-1}$; Vacciplant (*Laminaria* 4.5%)) a 1.6 $mL.L^{-1}$; Previcur Energy (Propamocarb 47.2%+Fosetil Al 27.6%) a 1.5 $mL.L^{-1}$; Ridomild Gold (Metalaxyl-M 4%+Mancozeb 64%) a 1.6 $mL.L^{-1}$; Orundis Opti (Oxatiapiprolin 0.5%+Clorotalonil 33.22%) a 1.0 $mL.L^{-1}$; y un testigo absoluto (agua corriente). Se evaluó la incidencia y severidad de la enfermedad, asi como el rendimiento. Se realizaron tres aplicaciones para disminuir la severidad de la enfermedad, donde los tratamientos con mayor eficacia fueron Orundis Opti con un 89.3%; Ridomild Gold con un 89.3%; Previcur Energy, con un 88.74%. Los tratamientos con menor eficacia fueron: Cu-Back con un 44.67%; Programic Mix-Top con un 43.5%; Cyr Mega con un 50.35%. Los mayores rendimientos se dieron con Orundis Opti con 33.56 $Ton.Ha^{-1}$; Ridomild Gold MZ68P con 28.56 $Ton.Ha^{-1}$ y Previcur Energy con 29.69 $Ton.Ha^{-1}$.

Palabras clave: Jitomate, evaluación, tizón, eficacia, Oxatiapiprolin.

[25] Departamento de Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México-Texcoco. 56230, Chapingo, México. esantiagoe@chapingo.mx
[26] Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura

Abstract

Tomato cultivation is highly susceptible to various phytosanitary issues, particularly late blight (*Phytophthora infestans*), which can reduce yields by 40% to 70%. Therefore, the objective of this research was to evaluate the effectiveness of various active ingredients against *P. infestans* in open field cultivation of the Rio Grande tomato variety. The experiment was conducted in Huitzo, Oaxaca, using a randomized complete block design with six replicates per treatment. Treatments consisted of applications every eight days of the following products: Cyr Mega (*Larrea tridentata* 95.0%) at 2.1 mL·L⁻¹; Cu-Back (Copper gluconate 25.0%) at 1.5 mL·L⁻¹; Coraza 720S (Clorotalonil 70%) at 1.0 mL·L⁻¹; Programic Mix-Top (Potassium Bicarbonate 85.0%) at 2.0 mL·L⁻¹; Curzate (Cymoxanil 8% +Mancozeb 70%) at 1.20 g·L⁻¹; Vacciplant (*Laminaria* 4.5%) at 1.6 mL·L⁻¹; Previcur Energy (Propamocarb 47.2% +Fosetyl-Al 27.6%) at 1.5 mL·L⁻¹; Ridomil Gold (Metalaxyl-M 4% +Mancozeb 64%) at 1.6 mL·L⁻¹; Orundis Opti (Oxatiapiprolin 0.5%+Clorotalonil 33.22%) at 1.0 mL·L⁻¹; and an absolute control (tap water). Disease incidence and severity were evaluated, as well as crop yield. Three applications were made to reduce disease severity; The most effective treatments were Orundis Opti (89.3%) and Ridomil Gold (89.3%). Previcur Energy, with 88.74%. The treatments with the lowest efficacy were: Cu-Back with 44.67%; Programic Mix-Top with 43.5%; and Cyr Mega with 50.35%. The highest yields were obtained with Orundis Opti at 33.56 Ton.Ha^{-1}; Ridomil Gold MZ68P at 28.56 Ton.Ha^{-1} and Previcur Energy at 29.69 Ton.Ha^{-1}.

Keywords: Tomato, evaluation, blight, efficacy, Oxathiapiprolin.

Introducción

En 1843, una devastadora enfermedad afectó a las papas estadounidenses y dos años después, en 1845, el patógeno se extendió a Europa, causando una destructiva enfermedad de la papa, la gran hambruna irlandesa, que provocó la muerte de aproximadamente un millón de personas y la emigración de otro millón, ya que las papas eran un alimento básico. El responsable fue identificado como *Botrytis infestans* en 1846 por MJ Berkeley y posteriormente renombrado a *Phytophthora infestans* en 1876 por Anton de Bary, cuyo nombre se refiere a "destructor de plantas", afectando a diversas especies de la familia Solanáceas (Ristaino, 2002).

El jitomate (*Solanum lycopersicum*) también es susceptible a *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, enfermedad denominada como tizón tardío, la cual genera perdidas entre un 40 y

70% en la producción, siendo la enfermedad más importante que afecta el cultivo (Chavarro & Ángel, 2005). *P. infestans* (Oomycota) es común en zonas con temperaturas entre 15 a 22°C y humedad relativa mayor al 80%. El patógeno, se transmite a través de semillas de tomate y puede sobrevivir en forma de micelio en otras plantas cultivadas o arvenses de la familia de las solanáceas, o en residuos de cosecha, que permanecen en el suelo (Jaramillo *et al.* 2007).

Los síntomas del tizón tardío pueden encontrarse en cualquier parte aérea de la planta de tomate. Las hojas infectadas suelen presentar manchas de tejido muerto de color verde a marrón, rodeadas por un borde verde pálido o gris. En condiciones de alta humedad, las infecciones por tizón tardío pueden tener un aspecto empapado o marrón oscuro, y a menudo se describen como de aspecto grasiento. Puede observarse un crecimiento blanquecino y algodonoso en el envés de las hojas o en la parte inferior de los tallos (Gevens, 2026). Bajo condiciones favorables, (90-100% de humedad relativa) y temperaturas moderadas (16-27 °C*) P. infestans* tiene la capacidad de destruir cultivos enteros en pocos días debido a su corto ciclo de vida y a su alta tasa de esporulación (Pirondi *et al*., 2017), ocasionando pérdidas del rendimiento de hasta 100% (Nowick *et al*., 2012).

El manejo del tizón tardío se realiza principalmente utilizando variedades resistentes y aplicando fungicidas protectores o curativos (Forbes et al., 2013). Las aplicaciones preventivas de fungicidas son las más comunes debido a, que la mayoría de los modos de acción de estos productos inhiben la germinación de esporas, previniendo la infección (Pirondi *et al*., 2017). Sin embargo, los mismos autores mencionan que en la práctica los fungicidas pueden aplicarse también cuando la enfermedad ya está presente, una situación que ocurre comúnmente en el campo. A este manejo se le llama curativo. El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficacia biológica que presentan diversos producto comerciales y alternativos contra el tizón tardío (*Phytophthora* infestans) en campo abierto en el cultivo de jitomate var. Rio Grande.

Materiales y métodos

El experimento se realizó a campo abierto, en la comunidad de Santa María Tenexpam, Huitzo, Oaxaca, durante el año 2025. Se utilizó la variedad “Rio Grande” susceptible al agente causal. La plántula se desarrolló en charolas de unicel de 200 cavidades con sustrato a base 50% de peet-moss, 25% perlita y 25% vermiculita regando diariamente con solución nutritiva Steiner al 50%, a los 28 dias se trasplanto a campo abierto. La temperatura promedio fue de 25.2-35.6 C° y la humedad relativa de 70-85% en la zona del experimento. Se utilizo un diseño experimental en bloques completamente al azar, cada tratamiento con 6

repeticiones. La unidad experimental estuvo compuesta por 15 plantas al azar, sembradas en suelo franco arcillo arenoso cubierto con acolchado plástico negro plateado calibre 200, y fertilizadas con una solución nutritiva Steiner al 75%. Los tratamientos consistieron en aplicaciones cada 8 dias, de los ingredientes activos descritos en el cuadro 1., Aplicados en aspersión al follaje con una boquilla de cono hueco.

Cuadro 1. Productos comerciales y alternativos utilizados para el control tizón tardío (*Phytophthora infestans*) en jitomate (*Solanum lycopersicum*).

Tratamiento	Producto comercial/ Ingrediente activo		Dosis
T1	Cyr Mega (*Larrea tridentata* 95.0%)		2.1 $mL.L^{-1}$
T2	Cu-Back (Gluconato de cobre 25.0%)		1.5 $mL.L^{-1}$
T3	Coraza 720S (Clorotalonil 70%)		1.0 $mL.L^{-1}$
T4	Programic Mix Top (Bicarbonato de potasio agrícola 85.0%)		2.0 $mL.L^{-1}$
T5	Curzate (Cymozanil 8%+ Mancozeb 70%)		1.20 $g.L^{-1}$
T6	Vacciplant (*Laminaria* sp. 4.5%)		1.6 $mL.L^{-1}$
T7	Previcur Energy (Propamocarb 47.2%+ Fosetil Al 27.6%)		1.5 $mL.L^{-1}$
T8	Ridomild Gold MZ68P (Metalaxyl-M 4% + Mancozeb 64%)		1.6 $mL.L^{-1}$
T9	Orundis Opti (Oxatiapiprolin 0.5%+ Clorotalonil 33.22%)		1.0 $mL.L^{-1}$
T10	Testigo absoluto (Agua corriente)		1000 $mL.L^{-1}$

Se evaluó la incidencia de la enfermedad, por unidad experimental (15 plantas al azar). Con respecto al total se determinó el porcentaje de incidencia. Con los datos obtenidos se determinó el porcentaje de incidencia de la enfermedad mediante la siguiente formula:

$$\% \text{ Incidencia} = [(A / B)]*100$$

Dónde:

A = Número de plantas dañadas o con síntomas característicos de la enfermedad en la muestra colectada dentro de parcela después de haber aplicado el producto comercial.
B = Número de plantas totales que componen la muestra.

Se evaluó la severidad de la enfermedad, por unidad experimental (15 plantas al azar) con base en el cuadro 2.

Cuadro 2. Escala de Henfling (1987) modificada para determinar la severidad por *P. infestans* en el cultivo de jitomate

Grado	Descripción
0	0 % de daño
1	Del 1 al 5 % de daño
2	Del 6 al 10 % de daño
3	Del 11 al 25 % de daño
4	Del 26 al 50 % de daño
5	Más del 50 % de daño

Se obtuvo el rendimiento de cada tratamiento, se cosecharon dos metros de dos surcos de cada unidad experimental, se pesó el rendimiento total y se calculó el rendimiento por hectárea

Resultados y discusiones

Se realizaron tres aplicaciones para disminuir la severidad de la enfermedad, donde los tratamientos con mayor eficacia biológica fueron (Fig 1a, 2a y 3a.). Orundis Opti (Oxatiapiprolin 0.50% + Clorotalonil 33.22%), presento un 85.45% de eficacia manteniendo esta tendencia en la segunda aplicación con un 89.3% y un 92.1% (Fig. 1b, 2b y 3b), lo cual puede deberse a una mezcla de Oxatiapiprolin, que afecta a todas las etapas del ciclo biológico asexual de *Phytophthora* sp., inhibiendo el desarrollo y la producción de esporangios y la liberación de zoosporas. Cuando se aplica de manera foliar y preventiva en los cultivos, estos no desarrollan lesiones debido a la inhibición de la liberación de zoosporas y la germinación de citosporas. El otro ingrediente activo, fue clorotalonil, que es un fungicida de contacto que permanece sobre el follaje asperjado, evitando que las esporas germinen y penetren causando nuevas infecciones, con fuerte acción protectante (Syngenta, 2018).

Según Hernández-Pérez *et al*., (2021), el Oxatiapiprolin mostró un importante efecto inhibitorio sobre un aislado mixto de P. infestans en condiciones *in vitro*, en concentraciones de 1-0.0016 ppm; inhibiendo el 50% del crecimiento poblacional del patógeno, debido a la actividad translaminar de Oxatiapiprolin, es por medio de la traslocación acropétala de las hojas de más edad a las hojas más jóvenes, y también se trasloca desde el sistema radicular a las hojas.

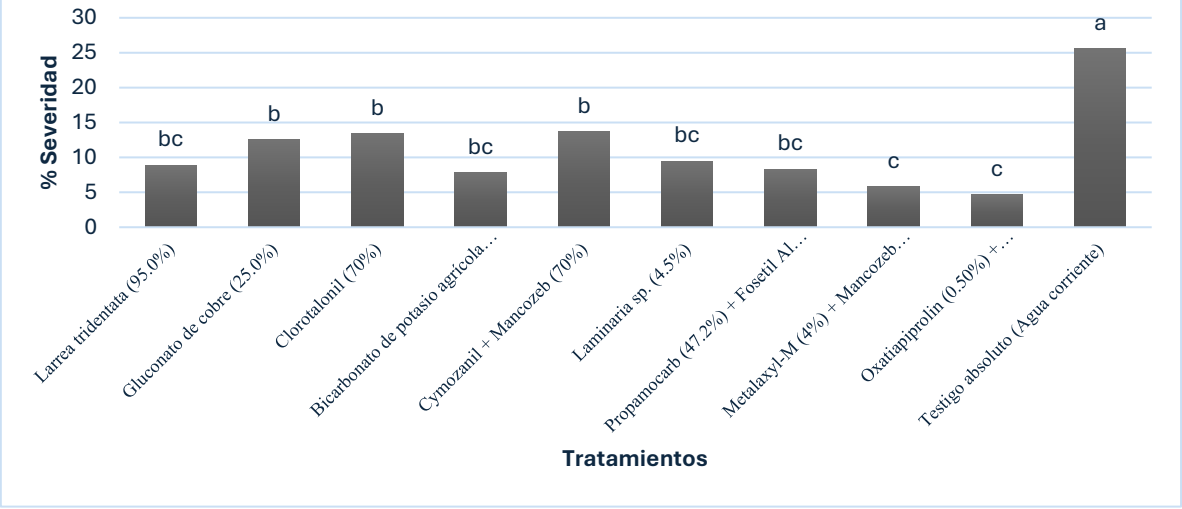


Figura 1ª. Porcentaje de severidad de tizón tardío (*P. infestans*) en jitomate var. Rio Grande, después de la primera aplicación de los tratamientos

En el caso del tratamiento con Ridomild Gold MZ68P (Metalaxyl-M 4% + Mancozeb 64%), fue un producto que en las tres aplicaciones se mantuvo constante en el manejo del tizón tardío, con un 85.45%, 89.3 y 88.12% de eficacia (Fig. 1b, 2b y 3b), lo cual se ve reflejado en campo, debido a que Metalaxil es eficaz contra *Pythium*, *Phytophthora*. También es eficaz como tratamiento curativo si debe aplicarse después de que la infección haya comenzado. El metalaxil es bastante soluble en agua y se transloca fácilmente desde las raíces a las partes aéreas de la mayoría de las plantas, pero su translocación lateral es leve. Debido a que el uso de metalaxil ya ha dado lugar a la aparición de cepas resistentes en algunos patógenos, se recomienda su uso en combinación con otros fungicidas de amplio espectro, por eso es que esta en mezcla con Mancozeb (64%) (Agrios, 2005).

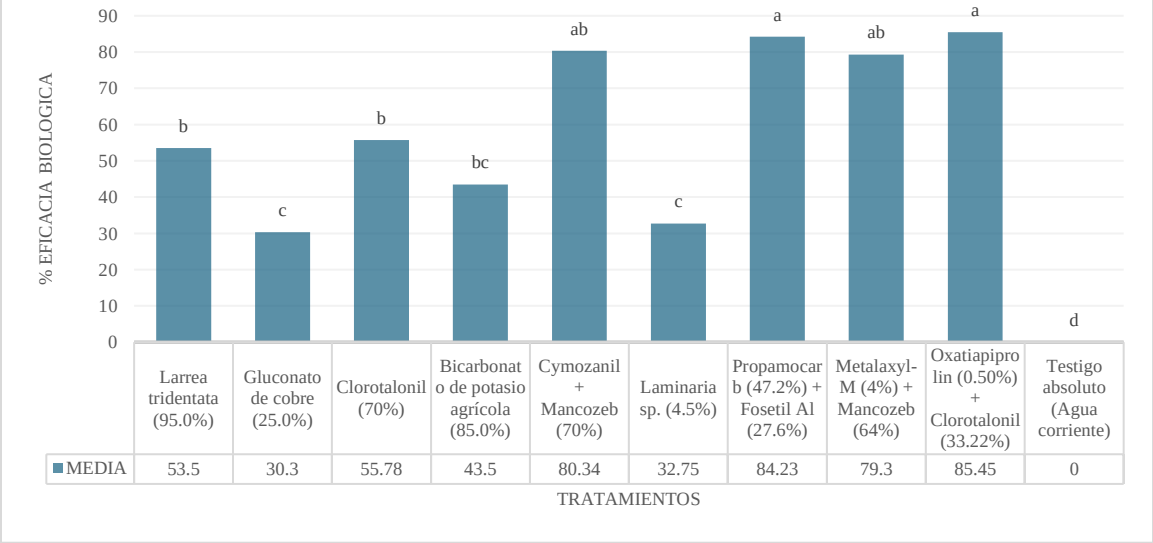


Figura 1b. Porcentaje de efectividad biológica de los tratamientos para el control tizón tardío (*P. infestans*) en jitomate var. Rio Grande después de la primera aplicación. Barras con letras distintas presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, P≤0.05).

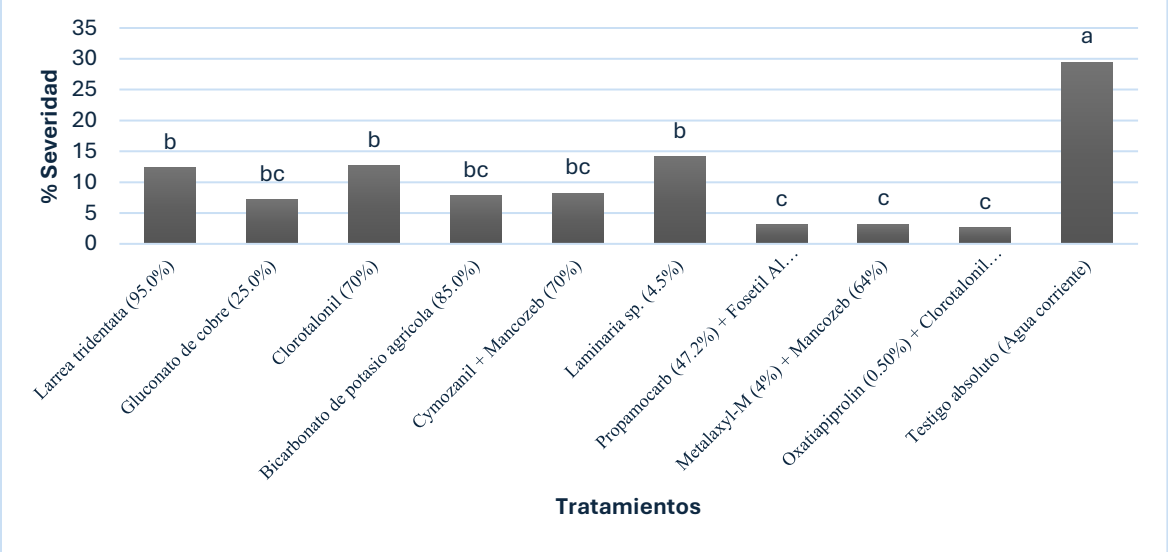


Figura 2a. Porcentaje de severidad de tizón tardío (*P. infestans*) en jitomate var. Rio Grande, después de la segunda aplicación de los tratamientos

Sin embargo, varias pruebas realizadas en inmersión de discos de hoja con dosis de producto comercial han ofrecido resultados que indican altos niveles tolerancia de las poblaciones de *P. infestans*, a fungicidas como Curzate® M-8, Previcur®, Ridomil® Gold y Mildex® 711 WG (García, et al., 2008).

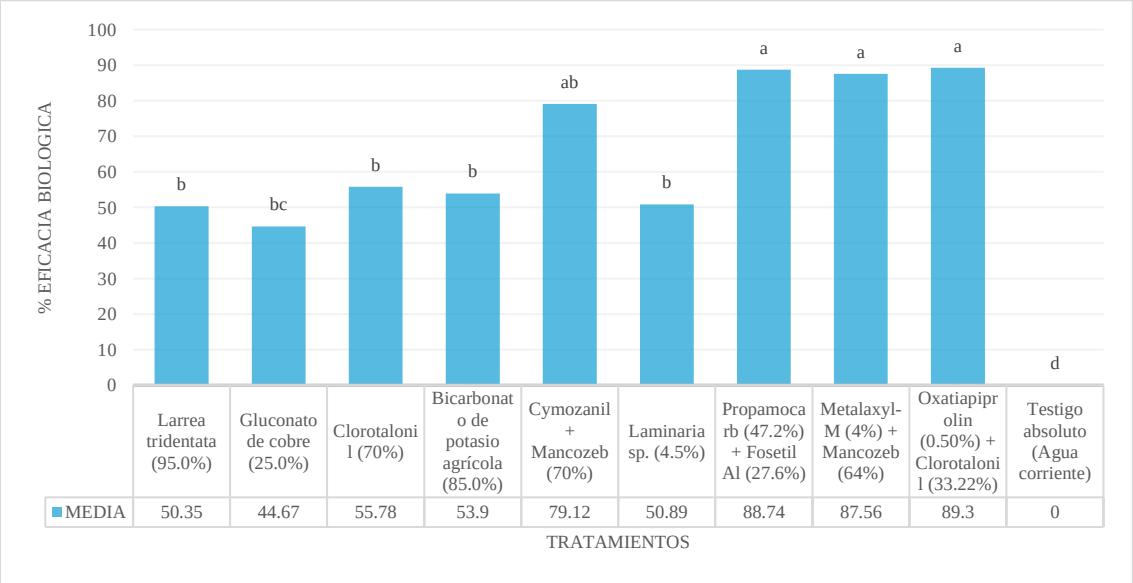


Figura 2b. Porcentaje de efectividad biológica de los tratamientos para el control tizón tardío (*P. infestans*) en jitomate var. Rio Grande después de la segunda aplicación. Barras con letras distintas presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, P≤0.05).

Para el tratamiento con Previcur Energy (Propamocarb 47.2%+ Fosetil Al 27.6%), al ser una mezcla de dos ingredientes activos, podemos ver que la eficacia en la primera aplicación fue de 84.23%, lo cual incremento en un 88.74% en la segunda, y genera un ligero incremento a 86.01% (Fig. 1b, 2b y 3b), esto puede deberse a que Propmocarb es móvil a través del xilema y puede utilizarse mediante riego, incorporación al suelo, inmersión o pulverización foliar. En el caso del tris- O- etilfosfonato de aluminio (Fosetilo-Al). Se degrada fácilmente a ácido fosfórico, se considera el principio activo y sistémico, ya que altera el metabolismo de los fosfolípidos. La aplicación aumenta la acumulación de fenoles y flavonoides antifúngicos , lo que resulta en una menor expresión de los síntomas (Dehne *et al*., 2001).

Los tratamientos con menor eficacia biológica fueron (Fig 1a, 2a y 3a.): Cu-Back (Gluconato de cobre) (25.0%), presento unas de las eficacias mas bajas dentro del experimento, con un

30.3%, seguido de un 44.67% para la segunda aplicación, y con un 46.82% para la tercera aplicación, donde el tratamiento tuvo una eficiencia por abajo del 50% (Fig. 1b, 2b y 3b), sabemos que el cobre al ser un fungicida y bactericida multisitio, de acción preventiva. Actúa por contacto y por absorción pasiva en las estructuras de los patógenos y está en estudio su acción translaminar. Su acción es producida por la forma iónica del cobre (Cu^{+2}) al remover electrones de la pared celular de los microorganismos ocasionando fracturas e inestabilidad funcional de la misma, destruyendo el funcionamiento de proteínas esenciales al metabolismo y deteriorando la estabilidad y funcionamiento de los ácidos nucleicos, sin embargo en el experimento el agente causal presento esporulaciones lo cual no concuerda, debido a que, el efecto fungicida del cobre, se ejerce fundamentalmente durante la etapa de germinación de las esporas, por contacto y de forma solo preventiva, por lo que sus aplicaciones son limitadas. Al inhibir la germinación de las esporas, evita la aparición de ataques secundarios de la enfermedad, lo cual no se vio reflejado en la eficacia biológica (Liñan, 2026).

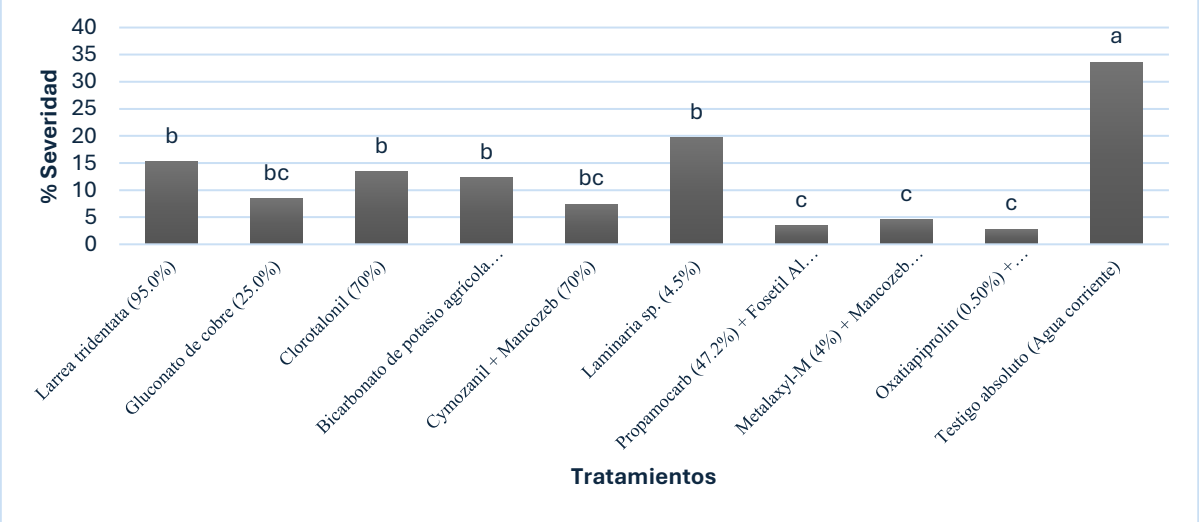


Figura 3ª. Porcentaje de severidad de tizón tardío (*P. infestans*) en jitomate var. Rio Grande, después de la tercera aplicación de los tratamientos.

Para el tratamiento Programic Mix Top (Bicarbonato de potasio agrícola) (85.0%) presento una eficacia de 43.5% en la primera y tercera aplicación, y con un 53.9% (Fig. 1b, 2b y 3b) en la segunda aplicación, lo cual refleja que el ingrediente activo, solo ejerce su efecto mediante el contacto con el agente causal, donde loos resultados obtenidos en la presente investigación no coinciden con lo reportado por Ilhan *et al*., (2006) y Deliopoulos *et al*.,

(2010), donde las propiedades antifúngicas de los bicarbonatos se obtienen cuando se aplican al follaje de plantas a dosis de 5 y 10 $g.L^{-1}$. Asimismo, estudios de Hasan *et al*., (2012), demuestran que los bicarbonatos actúan contra los hongos, al inhibir la germinación de esporas y la formación del tubo germinativo, también disminuyen su capacidad en la formación de esporas, lo cual posiblemente se vio afectado por las condiciones ambientales a las cuales estuvo expuso el experimento (T° 18-25 °C y HR debajo de 70 %) y solo se obtuvo hasta un 53.9% de eficacia en el tratamiento.

Cyr Mega (*Larrea tridentata*) (95.0%) presento un 53.5%, 50.35% y 58.75% (Fig. 1b, 2b y 3b) respectivamente, donde el producto solo afecta las esporas que estaban expuestas sobre al follaje, y no afecto considerablemente al agente causal intra e intercelularmente, esto coincide con lo mencionado por Lira-Saldivar *et al.*, (2003), donde el extracto de *Larrea* a concentraciones de 1000 y 2000 ppp, afecta en un 55% a los conidios de *Botrytis cinerea*, *Colletotrichum coccodes* y *Fusarium oxysporum* f. sp. *licopersici*, aislados de rosas de invernadero y de lotes comerciales de papa y tomate.

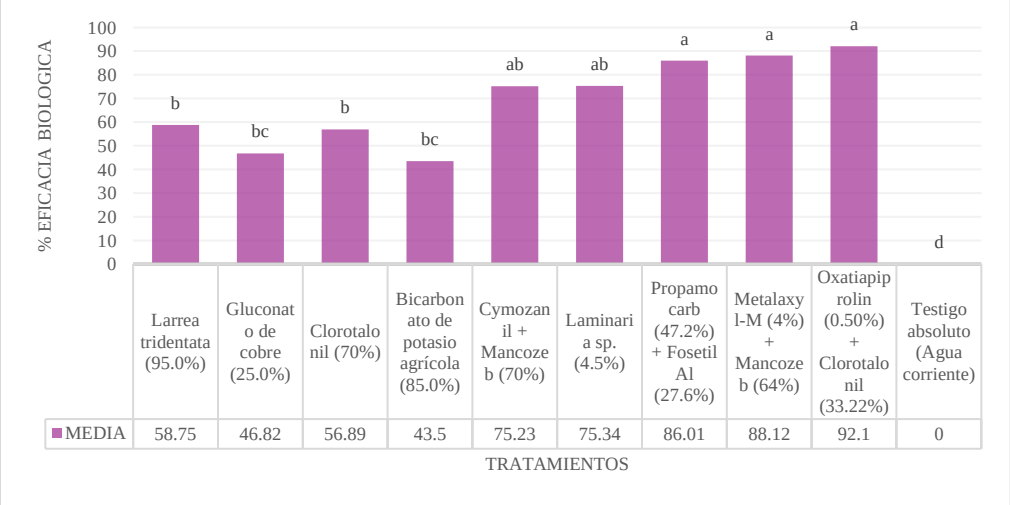


Figura 3b. Porcentaje de efectividad biológica de los tratamientos para el control tizón tardío (*P. infestans*) en jitomate var. Rio Grande después de la tercera aplicación. Barras con letras distintas presentan diferencias estadísticas significativas (Tukey, P≤0.05).

Para el caso del tratamiento Curzate (Cymozanil 8% + Mancozeb) (70%), presento un 80.34% en la primera aplicación, 79.12% y terminando con un 75.23% para la tercera aplicación (Fig. 1b, 2b y 3b), lo cual reduce ligeramente la eficacia del producto, cuando el producto al ser una mezcla tiene ambos sitios de acción tanto de forma sistémico como de

contacto, el cimoxanilo, al ser un fungicida de contacto, penetrante, con acción traslaminar y con sistemia local. Penetra rápidamente en los tejidos de la planta por lo que a las 2-3 horas de la aplicación es resistente al lavado por lluvia o riego. Presenta varios modos de acción posibles. Afecta el metabolismo de los hongos, principalmente inhibiendo la síntesis del ARN, la respiración micelial, la permeabilidad de la membrana celular y la reducción de la esporulación. Controla los ataques destruyendo el hongo en la superficie de las hojas en el momento de la germinación de las esporas, además al tener una mezcla con mancozeb: es un fungicida multisitio con acción preventiva por contacto sobre enfermedades foliares producidas por hongos endoparásitos. Afecta al ciclo Krebs, impidiendo la formación de ATP, el metabolismo de la glucosa, la oxidación de ácidos grasos y aminoácidos, la incorporación de O_2, la liberación de CO_2 y la formación de los lípidos de la membrana, siendo un ingrediente activo que no afecta crecimiento de micelio ni esporulación, por lo que puede generar inocuo para una siguiente esporulación en el tratamiento (Liñan, 2026).

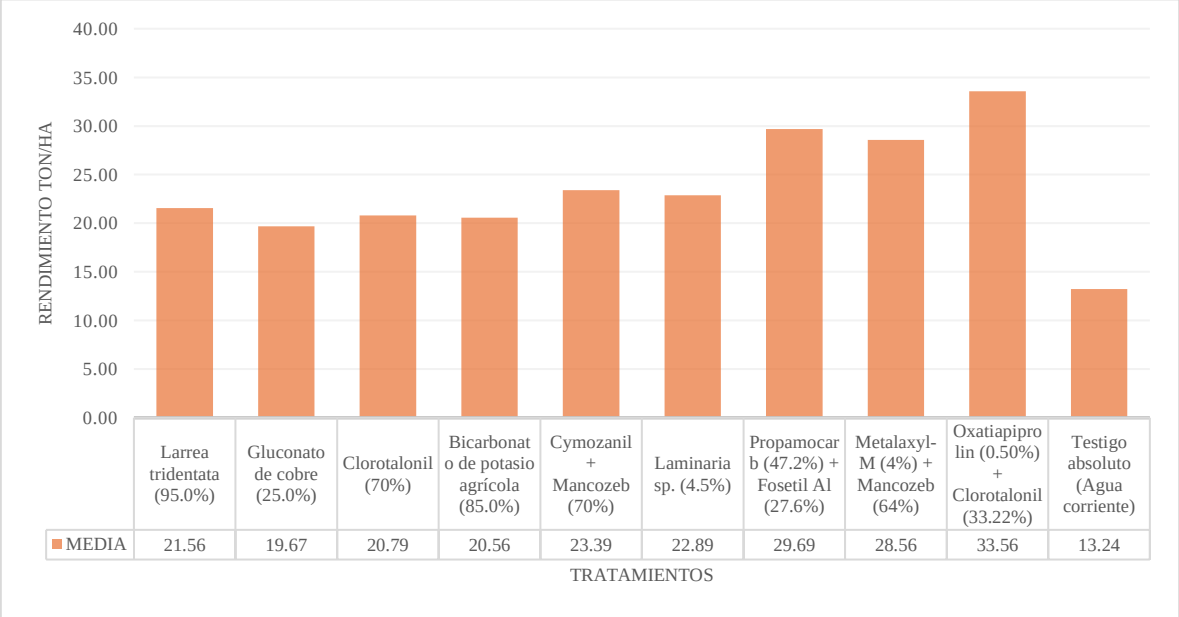


Figura 4. Rendimiento promedio (Ton/ha) en las diferentes variedades utilizadas contra el tizón tardío (*P. infestans*) en jitomate var. Rio Grande

En la figura 4, se muestran, los mayores rendimientos se presentaron con los tratamientos Oxatiapiprolin (0.50%) + Clorotalonil (33.22%) con un 33.56 $Ton.Ha^{-1}$ Metalaxyl-M (4%) + Mancozeb (64%) con un 28.56 $Ton.Ha^{-1}$; Propamocarb (47.2%) + Fosetil Al (27.6%) con un

29.69 Ton.Ha^{-1}. En el caso del menor rendimiento lo presentaron los tratamientos Gluconato de cobre (25.0%) con 19.67 Ton.Ha^{-1}, asi como Bicarbonato de potasio agrícola (85.0%) con 20.56 Ton.Ha^{-1}, y *Larrea tridentata* (95.0%) con un 21.56 Ton.Ha^{-1}, después de las tres aplicaciones de los tratamientos.

Conclusiones

Los tratamientos Orundis Opti (Oxatiapiprolin 0.50% + Clorotalonil 33.22%), presento un 89.3%; Ridomild Gold MZ68P (Metalaxyl-M 4% + Mancozeb 64%), fue un 89.3; Previcur Energy (Propamocarb 47.2%+ Fosetil Al 27.6%), fue de 88.74%. pueden considerarse como ingredientes activos para el control del tizon tardio. Se pueden utilizar también a Cu-Back (Gluconato de cobre) (25.0%), fue de 44.67%; Programic Mix Top (Bicarbonato de potasio agrícola) (85.0%) fue de 43.5%; Cyr Mega (*Larrea tridentata*) (95.0%) presento un 50.35% y 58.75%, estos productos pueden servir para la reducción del inoculo de tizón tardío en campo abierto de forma preventiva. Los mayores rendimientos fueron con los tratamiento de Oxatiapiprolin (0.50%) + Clorotalonil (33.22%) con un 33.56 Ton.Ha^{-1}; Metalaxyl-M (4%) + Mancozeb (64%) con un 28.56 Ton.Ha^{-1} y Propamocarb (47.2%) + Fosetil Al (27.6%) con un 29.69 Ton.Ha^{-1}, con lo cual tenemos varias herramientas para el manejo integral del tizón tardío.

Literatura citada

Abbott, W. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. Journal of Economic Entomology, 18, 256-267.

Agrios, George N. (2005). Plant Pathology. Control of plant diseases. 293–353.

Arboleda-Giraldo, D. (2021). Inducción de defensa en *Solanum betaceum* hacia el ataque por *Phytophthora infestans* sensu lato mediante ácido β-aminobutírico.

Cardona-Piedrahita, L.F.; Castaño-Zapata, J.; Ceballos-Aguirre, N. (2016). Epidemiología del tizón tardío [*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary] en quince introducciones de tomate silvestre. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 19(1): 45-54.

Chavarro, E.; Ángel, J.E. (2005). Reacción en cadena de la polimerasa 16S ADNr y amplificación aleatoria de polimorfismos de ADN para la detección y diferenciación molecular de *Ralstonia solanacearum* en plantas de *Musa* sp. Memorias II Seminario

Internacional Sobre Producción, comercialización e industrialización de plátano. Manizales. Colombia. p.14-31.

Dehne HW, Gisi U, Kuck KH et al. (2001). Modern Fungicides and Antifungal compounds III. 13th International Reinhardsbrunn Symposium. Bonn: AgroConcept.

Deliopoulos, T.; Kettlewell, P. S. and Hare, M. C. (2010). Fungal disease suppression by inorganic salts: a review. Crop Protection.29(10):1059-1075

FRAC. (2026). Fungicide Resistance Action Comite. Germany. disponible en: http://www.frac.info/home

Forbes, G. A., Morales, J. G., Restrepo, S., Pérez, W., Gamboa, S., Ruiz, R., & Oliva, R. (2013). Phytophthora infestans and Phytophthora andina on Solanaceous hosts in South America. En K. Lamour (ed.), Phytophthora: A global perspective (pp.48-58). Oxfordshire, United Kingdom: CABI International.

Gevens, A. J. (2026). Tomato Late Blight. USA, Wisconsin Madison, disponible en: https://vegpath.plantpath.wisc.edu/diseases/tomato-late-blight/

Hasan, M. F.; Mahmud, T. M. M.; Kadir, J.; Ding, P. and Zaidul, I. S. M. (2012). Sensitivity of *Colletotrichum gloeosporioides* to sodiumbicarbonate on the development of anthracnose in papaya(Carica papaya L. cv. Frangi). Aus. J. Crop Sci. 6(1):17-22.

Hernández Pérez, R., Ramírez Pedráza, T. J., & Casanovas Cosío, E. (2021). Evaluación de la sensibilidad de *Phytophthora infestans* (Mont) Bary al fungicida Oxatiapiprolin. Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas, 4(3), 89-94.

Ilhan, K.; Arslan, U. and Karabulut, O. A. (2006). The effect of sodium bicarbonate alone or in combination with a reduced dose of tebuconazole on the control of apple scab. Crop Protec. 25:963-967.

Lira-Saldivar, R.H., (2003). Estado Actual del Conocimiento Sobre las Propiedades Biocidas de la Gobernadora [*Larrea tridentata* (D.C.) Coville]. Revista Mexicana de Fitopatología, 21: 214-222

Liñan, C. D. (2026). Gluconato de Cobre. ECOVAD, México. Productos e insumos para la agricultura y biodinámica. Portal Tecnoagricola. Disponible en: https://buscador.portaltecnoagricola.com/ecovad/mex/producto/UMBRAL

Liñan, C. D. (2026). Curzate. ECOVAD, México. Productos e insumos para la agricultura y biodinámica. Portal Tecnoagricola. Disponible en: https://buscador.portaltecnoagricola.com/vademecum/mex/producto/17907/CURZATE%C2%AE%20M-8

Jaramillo, J.; Rodríguez, V.P.; Guzmán, M.; Zapata, M. & Rengifo, T. (2007). Manual Técnico de Buenas Prácticas Agrícolas - BPA en la producción de tomate bajo condiciones protegidas. CORPOICA - MANA - Gobernación de Antioquia - Centro de Investigación La Selva. FAO. Colombia. p.179-180; 199-106; 219-224.

Nowicki M., M. R. Foolad, M. Nowakowska and E. U. Kozik (2012). Potato and tomato late blight caused by *Phytophthora infestans*: an overview of pathology and resistance breeding. Plant Disease 96(1), 4–17. Recuperado de https://doi.org/10.1094/PDIS-05-11-0458

Pirondi A., A. Brunelli, E. Muzzi, and M. Collina. (2017). Post-infection activity of fungicides against Phytophthora infestans on tomato (*Solanum lycopersicum* L.). Journal of General Plant Pathology, 83(4), 244-252.

Ristaino, J. B. (2002). Tracking historic migrations of the Irish potato famine pathogen, *Phytophthora infestans*. *Microbes Infect.* 4, 1369–1377.

Syngenta. (2018). Orundis Opti, Ficha técnica. Pp 1-5. disponible en: https://www.syngenta.com.mx/product/crop-protection/orondis-opti

Evaluación del efecto de aceites esenciales de especies aromáticas sobre gusano cogollero (Spodoptera frugiperda)

Edgar López López[27], Gustavo Adolfo Anaya Montiel, Edgar Pascual Bustos Vargas, Miguel Ángel Serrato Cruz[28]

Resumen

El gusano cogollero, Spodoptera frugiperda, constituye una de las principales plagas del maíz y su manejo depende frecuentemente de insecticidas sintéticos. El objetivo de este trabajo fue evaluar aceites esenciales de especies aromáticas del Centro de México con potencial para el manejo agroecológico de larvas de S. frugiperda. Se obtuvieron aceites esenciales de pericón (Tagetes lucida), eucalipto (Eucalyptus globulus), telimón o zacate limón (Cymbopogon citratus) y toronjil morado (Agastache mexicana). Los aceites se aplicaron a diferentes concentraciones mediante exposición por contacto y proximidad a discos impregnados, registrándose mortalidad, movilidad, evitación y consumo. Los resultados mostraron una respuesta dependiente de la concentración. T. lucida presentó la mayor actividad; desde 0.1 % (v/v) redujo la movilidad y alteró la respuesta a estímulos, mientras que a 0.5 y 1.0 % ocasionó pérdida rápida de movilidad y mortalidad larval. En C. citratus, concentraciones de 0.5 a 5.0 % redujeron progresivamente la actividad y el consumo, con mortalidad en las concentraciones superiores. E. globulus produjo principalmente alteraciones conductuales y disminución de la movilidad desde 0.5 %, mientras que A. mexicana mostró evitación, menor desplazamiento y reducción del consumo entre 1.0 y 5.0 %. En conjunto, T. lucida mostró el efecto insecticida más intenso y a menores concentraciones, por lo que se identificó como el material con mayor potencial para su caracterización química y desarrollo como bioinsumo contra S. frugiperda.

Palabras clave: bioinsumo, gusano cogollero, pericón, aceites esenciales, manejo agroecológico.

Abstract

The fall armyworm, Spodoptera frugiperda, is one of the major pests of maize, and its management frequently relies on synthetic insecticides. The objective of this study was to evaluate essential oils from aromatic species of Central Mexico with potential for the

[27] Universidad Tecnológica de Mineral de la Reforma, Real de Minas 1000-A, Col. Paseos de Chavarría, Ex Hacienda de Chavarría, Mineral de la Reforma, Hgo. C.P. 42186. e_lopez_87@hotmail.com
[28] Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia, km 38.5 carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México, México. serratocruz@gmail.com

agroecological management of S. frugiperda larvae. Essential oils were obtained from sweet-scented marigold (Tagetes lucida), eucalyptus (Eucalyptus globulus), lemongrass (Cymbopogon citratus), and Mexican giant hyssop (Agastache mexicana). The oils were applied at different concentrations through contact exposure and proximity to impregnated discs, and mortality, mobility, avoidance, and feeding were recorded. The results showed a concentration-dependent response. T. lucida exhibited the highest activity; from 0.1% (v/v), it reduced mobility and altered the response to stimuli, whereas at 0.5 and 1.0% it caused rapid loss of mobility and larval mortality. In C. citratus, concentrations from 0.5 to 5.0% progressively reduced activity and feeding, with mortality occurring at the higher concentrations. E. globulus mainly caused behavioral alterations and reduced mobility from 0.5%, whereas A. mexicana produced avoidance, reduced movement, and decreased feeding at concentrations between 1.0 and 5.0%. Overall, T. lucida showed the strongest insecticidal effect and was effective at lower concentrations; therefore, it was identified as the material with the greatest potential for chemical characterization and development as a bioinput for the management of S. frugiperda.

Keywords: bioinput, fall armyworm, sweet-scented marigold, essential oils, agroecological management.

Introducción

S. frugiperda (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), conocida como gusano cogollero, es una plaga de importancia agrícola por su capacidad de alimentarse de numerosos hospederos y por los daños que ocasiona principalmente en maíz (Goergen et al, 2016). La alimentación larval en el cogollo reduce el área foliar funcional y, cuando la infestación ocurre en etapas tempranas, puede afectar el establecimiento y desarrollo del cultivo (Anjorin et al., 2023).

El control de esta plaga suele basarse en aplicaciones de insecticidas sintéticos. Aunque estos productos pueden disminuir rápidamente las poblaciones larvales, su uso reiterado incrementa los costos de producción y puede favorecer problemas de resistencia, residuos y afectación de organismos no blanco (Bhosle et al., 2024). Por ello, existe interés en alternativas de origen vegetal que puedan incorporarse a estrategias de manejo integrado y agroecológico.

Los aceites esenciales son mezclas complejas de compuestos volátiles producidos por plantas aromáticas. Algunos de sus componentes pueden actuar como tóxicos por contacto o fumigación, repelentes, inhibidores de la alimentación o modificadores del comportamiento de los insectos (Campolo et al, 2018). No obstante, su actividad depende de la especie

vegetal, composición química, dosis, método de exposición y estado de desarrollo del organismo evaluado (Abdelmohsen & Elmaidomy, 2025).

En el Centro de México existen especies aromáticas cultivadas o de distribución regional con antecedentes de uso tradicional y potencial biológico. Entre ellas destaca T. lucida Cav. (pericón), especie aromática de interés por la composición de su aceite esencial y por antecedentes de actividad biológica en insectos (Salehi et al., 2018). También se consideraron aceites de E. globulus, telimón o zacate limón (C. citratus) y un material de A. mexicana recolectado en el estado de Hidalgo.

El objetivo fue evaluar de manera preliminar el efecto de aceites esenciales de T. lucida, E. globulus, C. citratus y A. mexicana regional sobre larvas de S. frugiperda, para identificar los materiales con mayor actividad y establecer prioridades para ensayos posteriores de dosis-respuesta y desarrollo de un bioinsumo vegetal.

Materiales y métodos

Material vegetal y aceites esenciales

Se utilizaron materiales vegetales de pericón (T. lucida), eucalipto (E. globulus), telimón o (C. citratus) y toronjil morado (A. mexicana), colectados en diferentes localidades del estado de Hidalgo, México. El material vegetal fue seleccionado, limpiado y acondicionado previamente al proceso de extracción.

Los aceites esenciales se obtuvieron mediante hidrodestilación, utilizando un destilador de cobre con capacidad de 20 L, adaptado con columna empacada con cobre. Para cada especie, el material vegetal fue colocado en el equipo de destilación con un volumen suficiente de agua y sometido a calentamiento hasta alcanzar la ebullición. El proceso se mantuvo durante el tiempo necesario para favorecer la liberación y recuperación de los compuestos volátiles. Una vez concluida la destilación, la fase oleosa fue separada de la fase acuosa y el aceite esencial obtenido se recuperó y almacenó en frascos ámbar, protegido de la luz y bajo condiciones de refrigeración hasta su utilización en los bioensayos. El rendimiento de extracción de cada aceite esencial se calculó a partir de la relación entre la cantidad de aceite recuperado y la cantidad de material vegetal procesado, expresándose como porcentaje de rendimiento.

Material biológico

Se utilizaron larvas de S. frugiperda en estado de desarrollo susceptible a la exposición experimental. Para completar la trazabilidad del estudio se deberá señalar el origen de las

larvas, método de identificación, instar, dieta o alimento proporcionado, condiciones de temperatura, humedad relativa y fotoperiodo, así como el periodo de aclimatación.

Bioensayo

Los aceites esenciales se evaluaron mediante bioensayos de contacto y exposición por proximidad a discos impregnados a diferentes concentraciones (0.1, 0.5, 1.0, 2.5 y 5.0 %.). Cada larva de S. frugiperda fue colocada individualmente en una unidad experimental, evitando el contacto entre individuos y asegurando condiciones homogéneas de observación. Para cada aceite se evaluaron diferentes concentraciones, incluyendo un tratamiento testigo sin aceite esencial.

Los discos fueron impregnados con las soluciones correspondientes a cada concentración y colocados en las unidades experimentales junto con las larvas. Durante el periodo de exposición se registraron mortalidad, movilidad, respuesta de evitación, aproximación al disco y consumo de alimento. Las observaciones se realizaron a 1, 6, 12, 24 y 48 h posteriores al inicio del bioensayo.

La mortalidad se consideró cuando las larvas no presentaron movimiento ni respuesta después de una estimulación mecánica suave. Asimismo, se registraron disminución de la movilidad, contracciones, cambios en el desplazamiento y conductas de evitación relacionadas con la presencia del aceite esencial. El consumo se evaluó a partir de la disminución del alimento disponible durante el periodo experimental.
El diseño experimental incluyó cinco concentraciones por aceite, un control negativo y las repeticiones necesarias para evaluar la variabilidad de la respuesta. La estructura general del bioensayo, las variables registradas, los tiempos de evaluación y la finalidad de cada componente se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Diseño experimental y variables registradas en el bioensayo con aceites esenciales sobre larvas de S. frugiperda.

Componente	Propuesta	Registro requerido	Finalidad
Tratamientos	Cuatro aceites esenciales	Especie, lote y composición	Comparar actividad
Concentraciones	Cinco dosis en progresión	µL/disco, µL/mL o mg/mL	Construir curva dosis-respuesta

Componente	Propuesta	Registro requerido	Finalidad
Repeticiones	Mínimo 3 repeticiones	Número de larvas por repetición	Estimar variabilidad
Controles	Negativo, vehículo y positivo	Mortalidad corregida	Atribuir el efecto al aceite
Tiempos	1, 6, 12, 24 y 48 h	Mortalidad y conducta	Estimar rapidez de acción
Variables	Mortalidad y consumo	Porcentaje y masa consumida	Cuantificar efecto insecticida y antialimentario

Análisis estadístico

Los datos de mortalidad se corrigieron, cuando fue necesario, en función de la mortalidad registrada en el tratamiento testigo. La respuesta de mortalidad se analizó mediante modelos binomiales y análisis Probit, con el propósito de evaluar la relación concentración–respuesta y estimar las concentraciones letales media y alta (CL_{50} y CL_{90}), junto con sus respectivos intervalos de confianza. Las variables continuas, incluyendo el consumo de alimento, se analizaron mediante análisis de varianza y, cuando las características de los datos así lo requirieron, mediante modelos lineales generalizados. Las diferencias entre tratamientos y concentraciones se consideraron significativas cuando $p < 0.05$. Adicionalmente, la supervivencia de las larvas a través del tiempo se evaluó mediante curvas de Kaplan–Meier, y las diferencias entre los tratamientos se compararon mediante pruebas de rangos logarítmicos (log-rank). Todos los análisis estadísticos se realizaron considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Resultados y discusión

Respuesta de las larvas

La respuesta de las larvas de S. frugiperda varió en función del aceite esencial, la concentración y el tiempo de exposición. En términos generales se observó un incremento progresivo de la actividad insecticida conforme aumentó la concentración, aunque la intensidad y rapidez de la respuesta fueron diferentes entre las especies vegetales evaluadas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Respuesta de larvas de S. frugiperda a diferentes concentraciones de aceites esenciales después de 48 h de exposición.

Aceite esencial	Concentración (% v/v)	Respuesta predominante	Mortalidad a 48 h
T. lucida	0.1	Menor movilidad y respuesta a estímulos	36.7 ± 3.3
	0.5	Inmovilidad, contracciones y mortalidad	70.0 ± 5.8
	1.0	Pérdida rápida de movilidad	86.7 ± 3.3
	2.5	Alta toxicidad	93.3 ± 3.3
	5.0	Mortalidad muy alta	100.0 ± 0.0
C. citratus	0.1	Menor actividad	13.3 ± 3.3
	0.5	Menor consumo y movilidad	23.3 ± 3.3
	1.0	Letargia y reducción del consumo	40.0 ± 5.8
	2.5	Parálisis progresiva	53.3 ± 3.3
	5.0	Mortalidad evidente	66.7 ± 3.3
E. globulus	0.1	Respuesta discreta	6.7 ± 3.3
	0.5	Evitación y menor movilidad	16.7 ± 3.3
	1.0	Alteraciones conductuales	23.3 ± 3.3
	2.5	Menor consumo y movilidad	36.7 ± 3.3
	5.0	Mortalidad moderada	53.3 ± 3.3
A. mexicana	0.1	Respuesta mínima	3.3 ± 3.3
	0.5	Evitación ligera	6.7 ± 3.3
	1.0	Evitación y menor consumo	13.3 ± 3.3
	2.5	Reducción del desplazamiento	23.3 ± 3.3
	5.0	Efecto antialimentario y mortalidad moderada	33.3 ± 3.3

El aceite esencial de T. lucida produjo la respuesta más rápida e intensa. Desde la concentración de 0.1 % (v/v) se observaron disminución de la movilidad, menor respuesta a estímulos mecánicos y cambios en la postura de las larvas. Estos efectos se intensificaron a 0.5 y 1.0 %, concentraciones en las que se registraron episodios de inmovilidad, contracciones y mortalidad durante las primeras 24 h de exposición. A concentraciones de 2.5 y 5.0 %, la pérdida de movilidad ocurrió en un periodo más corto y la mortalidad acumulada a las 48 h fue considerablemente superior a la observada con los demás aceites.

C. citratus mostró una respuesta dependiente tanto de la concentración como del tiempo de exposición. Las concentraciones de 0.1 y 0.5 % produjeron principalmente disminución de la actividad y reducción del consumo, mientras que a partir de 1.0 % se observaron con mayor frecuencia letargia y pérdida progresiva de la movilidad. En los tratamientos de 2.5 y 5.0 %

se presentó mortalidad larval, particularmente entre las 24 y 48 h, lo que evidenció una acción más lenta que la observada con T. lucida.

En las larvas expuestas al aceite esencial de E. globulus, la respuesta predominante fue de tipo conductual. A partir de 0.5 % se registraron reducción del desplazamiento, alejamiento del área impregnada y menor aproximación al alimento. La intensidad de estas respuestas aumentó entre 1.0 y 5.0 %, acompañándose de mortalidad moderada en las concentraciones superiores. No obstante, la rapidez de acción y la mortalidad acumulada fueron inferiores a las registradas con T. lucida.
El aceite de A. mexicana presentó el efecto menos intenso de los cuatro materiales evaluados. Las concentraciones inferiores produjeron cambios conductuales discretos, mientras que entre 1.0 y 5.0 % se observó mayor evitación del área tratada, reducción del desplazamiento y disminución del consumo. La mortalidad fue menor que la registrada con los demás aceites, incluso en las concentraciones superiores, lo que sugiere que su principal actividad podría relacionarse con efectos repelentes o antialimentarios más que con una toxicidad aguda.

En conjunto, los resultados mostraron un gradiente de actividad en el orden T. lucida > C. citratus > E. globulus > A. mexicana. La respuesta de T. lucida destacó tanto por presentarse a concentraciones menores como por la rapidez con la que se manifestó la pérdida de movilidad y la mortalidad, mientras que los demás aceites mostraron una mayor participación de efectos conductuales y antialimentarios.

Análisis de la respuesta concentración–mortalidad
El análisis de la mortalidad confirmó una relación positiva entre la concentración de los aceites esenciales y la mortalidad de las larvas de S. frugiperda. La concentración tuvo un efecto significativo sobre la probabilidad de mortalidad para los cuatro aceites evaluados ($p < 0.05$), aunque la magnitud de la respuesta difirió entre las especies vegetales.El aceite esencial de T. lucida presentó la mayor actividad, con una CL_{50} estimada de 0.18 % (v/v) y una CL_{90} de 1.63 %, lo que confirmó su efecto a concentraciones considerablemente menores que las requeridas por los demás tratamientos. Para C. citratus, la CL_{50} se estimó en 1.99 %, mientras que la CL_{90} se situó por encima de la concentración máxima evaluada (5.0 %). En E. globulus, la CL_{50} estimada fue de 4.74 %, mientras que la CL_{90} también excedió el intervalo experimental. En el caso de A. mexicana, tanto la CL_{50} como la CL_{90} se estimaron por encima de 5.0 %, lo que concuerda con la menor mortalidad observada y con el predominio de respuestas conductuales y antialimentarias.

Evidencia visual del bioensayo

El seguimiento visual de las larvas permitió complementar los registros de mortalidad, movilidad y respuesta conductual obtenidos durante los bioensayos. La exposición individual facilitó la observación de cambios en la postura corporal, desplazamiento, aproximación al tratamiento y respuesta a estímulos después del contacto o proximidad con los discos impregnados con los aceites esenciales.

En la Figura 1 se muestra la disposición utilizada para la exposición de las larvas a los tratamientos, incluyendo un disco de 6 mm impregnado con la solución correspondiente. Este sistema permitió mantener una fuente localizada del aceite esencial y observar directamente la interacción de las larvas con el área tratada. Entre las respuestas registradas se encontraron aproximación o evitación del disco, disminución del desplazamiento, contracciones corporales y pérdida progresiva de movilidad, cuya intensidad varió en función del aceite esencial y de la concentración evaluada.



Figura 1. Larva de S. frugiperda expuesta a disco de 6 mm impregnado con aceite esencial durante el bioensayo. Fuente: elaboración propia.

La Figura 2 muestra una larva utilizada durante el bioensayo acompañada de una escala métrica de referencia. Este registro permitió documentar las características morfológicas y el tamaño aproximado de los individuos empleados, además de facilitar la comparación visual de la postura y condición corporal de las larvas durante el periodo de exposición.



Figura 2. Larva de S. frugiperda con escala métrica de referencia utilizada para el registro morfométrico durante el bioensayo.Fuente: elaboración propia.

En conjunto, la evidencia visual respaldó las observaciones conductuales obtenidas durante el experimento. Las alteraciones más evidentes consistieron en reducción del desplazamiento, pérdida de respuesta a estímulos y cambios en la postura corporal, particularmente en los tratamientos de mayor actividad. Estos registros complementaron los datos cuantitativos de mortalidad y consumo y permitieron caracterizar de manera más integral la respuesta de S. frugiperda a los aceites esenciales evaluados.

Interpretación biológica

Las diferencias observadas entre los aceites esenciales evidenciaron que la respuesta de las larvas de S. frugiperda estuvo determinada tanto por la naturaleza del material vegetal como por la concentración empleada. El aceite esencial de T. lucida presentó la actividad más intensa, caracterizada por disminución rápida de la movilidad, pérdida de respuesta a estímulos y mortalidad a concentraciones menores que las requeridas por los demás aceites. Este comportamiento sugiere una elevada actividad biológica de sus componentes volátiles y una posible acción combinada de diferentes metabolitos presentes en el aceite.

La respuesta observada no necesariamente puede atribuirse a un solo compuesto. En los aceites esenciales, la actividad insecticida puede resultar de efectos aditivos o sinérgicos entre

sus constituyentes, los cuales pueden actuar simultáneamente mediante toxicidad por contacto, alteración de la función neuromuscular, repelencia e inhibición de la alimentación.

La rápida pérdida de movilidad registrada con T. lucida es consistente con un efecto tóxico agudo, mientras que la disminución del consumo observada durante la exposición indica que también pudieron intervenir mecanismos antialimentarios.

Con C. citratus se observó una respuesta más gradual, con reducción de la actividad y del consumo antes de presentarse mortalidad en las concentraciones superiores. Este patrón sugiere que su efecto combinó alteraciones conductuales con toxicidad dependiente de la concentración y del tiempo de exposición. En E. globulus predominaron la disminución del desplazamiento y la evitación del área tratada, lo que indica una participación importante de efectos repelentes y conductuales, aunque a concentraciones mayores también se presentó actividad insecticida.

Por su parte, A mexicana produjo principalmente evitación, reducción del desplazamiento y disminución del consumo, mientras que la mortalidad fue menor que en los demás tratamientos. Este comportamiento sugiere que su potencial podría estar asociado principalmente con propiedades repelentes o antialimentarias, más que con una toxicidad aguda directa.

En conjunto, los resultados muestran que los aceites evaluados no actuaron mediante un único tipo de respuesta. T. lucida destacó por su mayor efecto insecticida, mientras que C. citratus, E. globulus y A. mexicana mostraron una participación más evidente de respuestas conductuales y antialimentarias. Estas diferencias pueden estar relacionadas con la composición química, volatilidad, capacidad de penetración y estabilidad de cada aceite esencial. Por ello, la caracterización química mediante GC–MS permitirá relacionar los compuestos mayoritarios con la actividad biológica observada e identificar posibles marcadores asociados con el efecto sobre S. frugiperda.

Conclusiones

Los aceites esenciales evaluados produjeron respuestas diferenciadas sobre larvas de S. frugiperda, con una actividad dependiente de la especie vegetal, la concentración y el tiempo de exposición. T. lucida presentó la mayor actividad insecticida, debido a que produjo alteraciones en la movilidad desde concentraciones bajas y ocasionó una respuesta más rápida e intensa conforme aumentó la concentración.

C. citratus mostró un efecto intermedio, caracterizado por reducción progresiva de la actividad, disminución del consumo y mortalidad en las concentraciones superiores. E. globulus y A. mexicana generaron principalmente respuestas conductuales, de evitación y reducción de la alimentación, aunque también presentaron actividad insecticida a concentraciones elevadas.

En conjunto, los resultados permitieron establecer un gradiente de actividad de T. lucida > C. citratus > E. globulus > A. mexicana, destacando al aceite esencial de T. lucida como el material con mayor potencial para el desarrollo de una alternativa de origen vegetal contra S. frugiperda. La combinación de efectos insecticidas, conductuales y antialimentarios observados sugiere que estos aceites podrían contribuir al desarrollo de estrategias de manejo integrado con menor dependencia de insecticidas sintéticos.

La caracterización química de los aceites mediante GC–MS y la identificación de los compuestos asociados con la actividad biológica permitirán avanzar hacia la estandarización y formulación de un bioinsumo vegetal para su posterior evaluación en condiciones de invernadero y campo.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma Chapingo, a la Dirección General de Investigación Posgrado y Servicio al Departamento de Fitotecnia por las facilidades académicas y técnicas para el desarrollo del proyecto.

Literatura citada

Abdelmohsen, U., & Elmaidomy, A. H. (2025). Exploring the therapeutic potential of essential oils: a review of composition and influencing factors. Frontiers in Natural Products. https://doi.org/10.3389/fntpr.2025.1490511

Anjorin, F., Odeyemi, O., Adenike, O., Kehinde, A., & Kareem, T. (2023). Fall armyworm (Spodoptera frugiperda) (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) infestation: maize yield depression and physiological basis of tolerance. Journal of Plant Protection Research. https://doi.org/10.24425/jppr.2022.140294

Bhosle, D., Srinivasan, T., Elaiyabharathi, T., Shanmugam, P., & Vellaikumar, S. (2024). A review on use of botanical extracts for the management of fall armyworm Spodoptera frugiperda (Smith, 1797) [Noctuidae, Lepidoptera]. Journal of Plant Diseases and Protection, 132. https://doi.org/10.1007/s41348-024-01042-5

Campolo, O., Giunti, G., Russo, A., Palmeri, V., & Zappalà, L. (2018). Essential Oils in Stored Product Insect Pest Control. Journal of Food Quality. https://doi.org/10.1155/2018/6906105

Goergen, G., Kumar, P., Sankung, S. B., Togola, A., & Tamò, M. (2016). First Report of Outbreaks of the Fall Armyworm Spodoptera frugiperda (J E Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a New Alien Invasive Pest in West and Central Africa. PLoS ONE, 11. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165632

Salehi, B., Valussi, M., Morais-Braga, M., Carneiro, J. N., Leal, A., Coutinho, H., Vitalini, S., Kręgiel, D., Antolak, H., Sharifi-Rad, M., Silva, N., Yousaf, Z., Martorell, M., Iriti, M., Carradori, S., & Sharifi-Rad, J. (2018). Tagetes spp. Essential Oils and Other Extracts: Chemical Characterization and Biological Activity. Molecules, 23. https://doi.org/10.3390/molecules23112847

Evaluación del potencial antifúngico de extractos de *Magnolia mexicana* DC. contra cepas de *Colletotrichum* spp. y *Penicillium* spp

Jessica Miriam Medrano Hernández[29], Néstor Emanuel Hernández Vidal[30], Norma Marina Alarcón Rodríguez, Diana Guerra Ramírez

Resumen

Magnolia mexicana DC. es una especie arbórea nativa de México con importancia ecológica, etnobotánica y medicinal. La evidencia documental de usos tradicionales y experimentales sugiere que posee metabolitos bioactivos. El objetivo de este trabajo fue evaluar la actividad antifúngica de extractos de diferente polaridad obtenidos de hojas y pétalos de *M. mexicana* contra cepas de *Colletotrichum* spp. y *Penicillium* spp. Se realizó una extracción secuencial con solventes de polaridad creciente (hexano, diclorometano y metanol); los mayores rendimientos se obtuvieron con metanol tanto en hojas (4.41 %) como en pétalos (4.25 %). La actividad antifúngica se determinó mediante la técnica de medio envenenado para evaluar la inhibición del crecimiento micelial. Los extractos metanólicos de hojas y pétalos no mostraron una inhibición consistente sobre las dos cepas de *Penicillium* spp. evaluadas ni una respuesta dosis-dependiente. En contraste, *Colletotrichum* spp. presentó una mayor susceptibilidad, observándose una respuesta dependiente de la concentración con los extractos de hojas. El extracto metanólico alcanzó una inhibición máxima de 41.81 % a 15 mg/mL, mientras que el extracto de diclorometano registró una inhibición de 53.19 % a la misma concentración, diferencia que resultó significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$). El extracto de diclorometano mostró mayor inhibición, lo que sugiere que concentra los metabolitos responsables de la actividad observada. Estos resultados respaldan el potencial de *M. mexicana* como fuente de fitometabolitos con aplicación en el control de patógenos de importancia agrícola y justifica continuar con el aislamiento bioguiado y ensayos *in vivo.*

Palabras clave: Poscosecha, productos naturales, control biológico

Abstract

Magnolia mexicana DC. is a tree species native to Mexico with ecological, ethnobotanical, and medicinal importance. Documentary evidence from traditional uses and experimental

[29] Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, México. Área de Biología, Laboratorio de Investigación en Biodiversidad y Biotecnología Agrícola. jmedranoh@chapingo.mx; nalarconr@chapingo.mx

[30] Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, México. Área de Química, Laboratorio de Productos Naturales. emahernanv@gmail.com; dguerrar@chapingo.mx

studies suggests that it contains bioactive metabolites. The objective of this study was to evaluate the antifungal activity of extracts with different polarities obtained from the leaves and petals of *M. mexicana* against strains of *Colletotrichum* spp. and *Penicillium* spp. Sequential extraction was performed using solvents of increasing polarity (hexane, dichloromethane, and methanol). The highest extraction yields were obtained with methanol for both leaves (4.41%) and petals (4.25%). Antifungal activity was assessed using the poisoned medium technique to determine mycelial growth inhibition. Methanolic extracts from leaves and petals did not produce consistent inhibition against the two *Penicillium* spp. strains evaluated and showed no clear dose-dependent response. In contrast, *Colletotrichum* spp. exhibited greater susceptibility, with a concentration-dependent inhibitory response to the leaf extracts. The methanolic extract achieved a maximum inhibition of 41.81% at 15 mg/mL, whereas the dichloromethane extract reached 53.19% inhibition at the same concentration, a difference that was statistically significant (Tukey's test, $\alpha = 0.05$). The dichloromethane extract exhibited greater antifungal activity, suggesting that it concentrates the metabolites responsible for the observed activity. These findings support the potential of *M. mexicana* as a source of phytometabolites for the control of agriculturally important plant pathogens and justify further bioassay-guided isolation of the active compounds and their evaluation under *in vivo* conditions.

Keywords: Postharvest, natural products, biological control.

Introducción

Magnolia mexicana DC. es un árbol que puede alcanzar hasta 20 m de altura, con hojas glabras de color verde claro, flores terminales, solitarias y fragantes, multifolículo como fruto y semillas provistas de una sarcotesta de color rojo brillante (Hernández, 1980; Palacios, 2006). Antiguamente la especie se consideraba extendida desde el centro al sur de México (Hernández, 1980) sin embargo revisiones recientes la concentran en los estados de Oaxaca, Puebla y Veracruz (Rivers et al., 2016), donde habita principalmente en selvas altas perennifolias y bosques mesófilos de montaña. Estos ecosistemas se encuentran entre los más amenazados del país debido a cambio de uso del suelo, se estima que aproximadamente el 50 % de la superficie original del bosque mesófilo de montaña ha sido sustituida por otros tipos de cobertura vegetal (Palacios, 2006). Como consecuencia de la reducción de su hábitat natural, M. mexicana fue incluida en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 dentro de la categoría de especie amenazada (SEMARNAT, 2010) y según la Lista Roja de la UICN se considera como especie Vulnerable (Rivers et al., 2016).

Conocida comúnmente como flor de corazón o yoloxóchitl, Magnolia mexicana es una especie silvestre no domesticada, aunque suele fomentarse en huertos familiares con fines ornamentales o medicinales (Hernández, 1980). Desde finales del siglo XIX fue considerada

por Fernando Altamirano y José Ramírez como una especie adecuada para programas de repoblación forestal en México (Olvera & Lindig-Cisneros, 2005). Además de su valor ornamental, la madera es apreciada para construcción rural, cercas vivas y como árbol de sombra en plantaciones de café (Avendaño-Reyes & Acosta-Rosado, 2000). Sin embargo, uno de los principales intereses en M. mexicana radica en su potencial medicinal estudios documentales encontraron que aparece descrita en el Códice de la Cruz Badiano de plantas medicinales donde se mencionada con efecto descongestionante, y la vincularon a la especie descrita como *Talauma mexicana* de Micheli-Serra & Izaguirre-Ávila, 2014), taxon que actualmente se reconoce como Magnolia mexicana (Aldaba-Núñez et al. 2026; Waizel, 2002)). Waizel (2002) realizó una revisión extensa de la literatura disponible hasta ese año sobre las propiedades de M. mexicana, indicando que estudios farmacológicos en humanos y animales probaron la acción estimulante de la flor, hojas y corteza sobre las funciones cardiacas y presión arterial, fuentes históricas mencionan además funciones como antiespasmódico, antiepiléptico, antipirético, diurético y como tratamiento para enfermedades del sistema nervioso y cardiovascular, así como para aliviar la parálisis y favorecer la fertilidad (Waizel, 2002). Estudios posteriores de *M. mexicana* reportaron efectos significativos en la relajación de anillos de tráquea de ratas, sugiriendo su capacidad terapéutica en enfermedades como el asma (Sánchez-Recillas et al., 2014).

Las diversas actividades biológicas de las plantas se debe principalmente a los metabolitos secundarios que producen; estos compuestos participan en los procesos de adaptación de las plantas a su ambiente, su síntesis ocurre en respuesta a condiciones adversas tales como: a) el consumo por herbívoros, b) el ataque por microrganismos (virus, bacterias y hongos), c) la competencia por el espacio de suelo, la luz y nutrientes entre las diferentes especies de plantas y d) la exposición a la luz solar u otros tipos de estrés abiótico (Sepúlveda-Jiménez et al., 2003).

La búsqueda de nuevos antimicrobianos ha sido una necesidad constante, especialmente los antifúngicos generan mucho interés pues los disponibles actualmente no satisfacen las necesidades humanas ante la diversidad de patologías que provocan (Negri et al., 2014). Los productos naturales han sido desde tiempo ancestrales fuentes de moléculas para estos fines; derivados del metabolismo secundario las plantas son fuente de compuestos fenólicos, alcaloides, terpenos, flavonoides, quinonas, etc., con capacidad antimicrobiana y adecuados para su estudio formal (Rodríguez-Pava. 2017; Hernández-Diaz et al., 2001). En este sentido, evaluar la capacidad antifúngica de extractos de plantas para combatir patógenos fúngicos es relevante, pues estos son difíciles de combatir debido a su biología y su adaptabilidad. En agricultura, los hongos fitopatógenos causan pérdidas de 14% en los rendimientos de los cultivos, si bien se han aumentado y mantenido las cosechas con el uso de fungicidas artificiales, en la actualidad se busca no solo garantizar la producción sino también asegurar

el uso sostenible de los recursos naturales lo anterior proponiendo estrategias de control entre ellas los extractos vegetales (Anand & Rajeshkumar, 2022; Khwaza & Aderibigbe, 2023).

Colletotrichum spp. y *Penicillium* spp. figuran entre algunos de los principales hongos de relevancia agrícola poscosecha, además presentan características adecuadas para su uso como modelos de screening para determinar el potencial antifúngico de extractos (Chen et al., 2023). *Colletotrichum* es uno de los géneros de hongos fitopatógenos más importantes a nivel mundial; comprende numerosas especies capaces de infectar cultivos frutales, hortícolas, ornamentales y forestales, ocasionando la enfermedad conocida como antracnosis. Sus infecciones producen lesiones necróticas en hojas, flores, tallos y frutos, lo que ocasiona pérdidas económicas importantes tanto en campo como durante el almacenamiento (Salotti et al., 2023; Dean et al., 2012). Las especies del género *Penicillium* constituyen uno de los principales agentes causales del deterioro poscosecha de frutas y hortalizas, además de provocar pudriciones que reducen considerablemente la vida útil de los productos agrícolas, numerosas especies producen micotoxinas, generando riesgos para la inocuidad alimentaria y pérdidas económicas significativas durante el almacenamiento y comercialización (Yin et al., 2026).

En especies del género Magnolia se han encontrado metabolitos secundarios como lignanos, neolignanos, compuestos fenólicos, alcaloides y terpenoides con actividad biológica demostrada; una revisión reciente identificó 277 metabolitos en especies del género y propuso su potencial como fuente de biopesticidas y biofungicidas (Hernández-Rocha & Vásquez-Morales, 2023). Considerando la similitud fitoquímica entre especies del género y la escasa información disponible para *M. mexicana*, resulta pertinente evaluar sus extractos frente a hongos fitopatógenos de importancia agrícola, como *Colletotrichum* spp. y *Penicillium* spp., como modelos para la evaluación de compuestos antifúngicos. Objetivos

Evaluar la actividad antifúngica de extractos de hojas y pétalos de *Magnolia mexicana* DC. mediante la determinación del porcentaje de inhibición de los de contra tres hongos fitopatógenos de importancia en postcosecha.

Materiales y métodos

Preparación de los extractos de *Magnolia mexicana* DC.

La colecta de las hojas y pétalos de *Magnolia mexicana* DC. se realizó en el abril-junio de 2018, en la localidad de Huitzilan de Serdán del estado de Puebla (altitud: 967.44±15.8 msnm, coordenadas geográficas 19°58´15.1N, 97°41´49.30 O). Después las hojas se deshidrataron a temperatura ambiente y sombra, y los tépalos de las flores fueron liofilizaron (-44 °C, presión de vacío $17x10^{-3}$ mBar, Labconco® Corp., modelo 7751000, EE. UU.) debido a que son de una textura gruesa y carnosa, susceptibles a mayor oxidación.

Posteriormente ambos tejidos se molieron en licuadora hasta obtener un polvo o partículas menor a 0.5 cm.

A los materiales vegetales se les hizo una extracción sólido-líquido: para esto a las hojas (504 g) y pétalos (300 g) se les agregó hexano en proporción 1:1 (v/v) y se dejó macerar durante 3 días. Después se filtraron los macerados y a estos se les evaporó (45° C) el disolvente de extracción utilizando un evaporador rotatorio al vacío (Büchi®, R-210, Suiza) hasta sequedad para así obtener el extracto hexánico. Se repitió este proceso un total de 3 veces.

Los residuos vegetales de hojas y pétalos fueron sometidos a una extracción secuencial empleando primero diclorometano, y posteriormente metanol esto para incrementar gradualmente la polaridad de los disolventes de extracción. Para ambos disolventes se siguió el mismo procedimiento descrito para la preparación del extracto hexánico obteniéndose finalmente los extractos de diclorometano y metanol. Los extractos obtenidos fueron pesados, etiquetados y guardados a temperatura ambiente hasta su utilización.

Aislamiento de hongos fitopatógenos de postcosecha

Tres hongos fueron obtenidos mediante cámaras húmedas a partir de frutos contaminados y fueron purificados mediante cultivos monospóricos, posteriormente estas cepas fueron identificadas a nivel género mediante microscopía óptica como: *Penicillum* spp. aislado de frutos de plátano, *Penicillium* spp. aislado de frutos de papaya y *Colletotrichum* spp. aislado de frutos de guayaba.

La evaluación de la actividad antifúngica de los extractos de hojas y pétalos se hizo mediante la técnica de "medio envenenado" según Iglesias-Guevara y Sánchez-Torres (2024) con ligeras modificaciones, para esto los extractos de *Magnolia mexicana* DC. (metanólico de hojas y pétalos) fueron resuspendidos a una concentración adecuada con: agua destilada estéril, 5 % de dimetilsulfóxido (DMSO, Sigma®, Aldrich) y 1 % de Tween 80 (Sigma®, Aldrich), posteriormente se sonicaron (Cole Parmer®, Ultrasonic Cleaner 8890, EE. UU.) (10 minutos), se agitaron en un vortex (3 minutos, 3000 rpm) y finalmente se sonicaron (5 minutos) obteniéndose una solución stock la cual no requirió ser esterilizada para su uso.

Estas dos soluciones correspondientes a los extractos de hojas y pétalos se dispensaron distintas alícuotas para obtener las concentraciones de 1,3 y 5 mg de extracto (hojas o pétalos) / mL de papa, dextrosa, agar (PDA, BD Bioxon®, México) en placas Petri de pozos de 16 mm de diámetro, se aforaron a 1 mL con PDA (39 g/L), y se homogenizó el extracto mezclando perfectamente con la alícuota del extracto, se dejó que gelificaran las placas en un ambiente estéril.

Posteriormente a partir de cajas Petri (PDA, 6 cm de diámetro) con micelio de los tres hongos (*Penicillum* spp., *Penicillium* spp. y *Colletotrichum* spp.) de 7 días de crecimiento a 28 ± 1 °C, se preparó una solución de esporas de cada uno de ellos, para esto se agregó 5 mL de agua destilada estéril, y se raspó el micelio utilizando una espátula, posteriormente se tomó con una micropipeta la solución de esporas y se ajustó con un hemocitrómetro a una concentración de 1 x 10^5 esporas/mL.

Las placas de 24 pozos con diferentes concentraciones de extracto en PDA fueron inoculadas con 3 µL de cada una de las soluciones de esporas, esto por triplicado. Además, se inoculó con la solución de esporas de cada hongo como control negativo al PDA con 1% DMSO y 0.1 % Tween 80.

Posteriormente las placas fueron incubadas en obscuridad a 28±1 °C, y se registró el diámetro del crecimiento radial de las colonias de los hongos cada 6 horas con las cuales se construyeron curvas de crecimiento micelial y posteriormente se calculó el porcentaje de inhibición del extracto a las 36 h post inoculada la solución de esporas utilizando la siguiente ecuación (1):

$$\text{Porcentaje de inhibición} = \left[\frac{(\text{CMT} - \text{CMTr})}{\text{CMT}}\right] \text{x}100 \qquad (1)$$

Donde CTM: crecimiento micelial del control y CMTr: crecimiento micelial del tratamiento. El porcentaje de inhibición se reportó como el promedio del porcentaje de inhibición del hongo de las 3 repeticiones.

Posterior a la evaluación de estos extractos y concentraciones se decidió continuar con el estudio de la actividad antifúngica del extracto metanólico (5, 10 y 15 mg/mL) y de diclorometano (1, 3, 5, 10 y 15 mg/mL) en la cepa de *Colletotrichum* spp. aislada de frutos de guayaba utilizando los mismos métodos descritos anteriormente ya que en esta cepa se observó un efecto dosis-respuesta claro en comparación con las otras dos especies de *Penicillium* spp.

Análisis estadístico

Los porcentajes de inhibición se analizaron con un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores (extracto y concentración), con un grado de confiabilidad del 95 %, en donde se empleó un diseño completamente al azar (DCA) posteriormente se hizo una comparación de medias con el estadístico de prueba Tukey (α=0.05), el software empleado fue Minitab (versión 18.1, 2017).

Resultados y discusión

Rendimientos de los extractos

A partir de 504 g de hojas y 300 g de pétalos de *M. mexicana* DC. se obtuvieron seis extractos a distintas polaridades (Cuadro 1). Los extractos con mayor rendimiento fueron los que se obtuvieron a partir de la extracción con metanol en ambos órganos vegetales como también se ha observado en otras especies del género *Magnolia* spp. en donde se observa que a mayor polaridad mayor rendimiento de extractos (Caballero-Chávez et al., 2025). Y de forma similar para la especie en otros estudios (Medrano-Hernández et al., 2017, Sánchez-Recillas et al. 2014). Esto es debido a que el metanol extrae mezclas amplias de compuestos polares y semipolares, incluyendo residuos de compuestos de baja polaridad (Ghaffar y Perveen, 2025). El rendimiento de los extractos de los pétalos se observa que el hexánico se extrajo en una mayor cantidad que el extracto de diclorometano, lo cual podría atribuirse a una fracción importante de compuestos lipofílicos, principalmente terpenoides y otros metabolitos volátiles, los cuales se encuentran abundantemente representados en los pétalos del género *Magnolia* spp. (Hu et al. 2026)

Cuadro 1. Rendimiento de los extractos preparados de *Magnolia mexicana* DC. a diferentes polaridades.

Extracto	Peso (g)	Rendimiento (%)
Hojas		
Hexánico	6.77	1.34
Diclorometano	8.83	1.75
Metanólico	22.23	4.41
Pétalos		
Hexánico	9.01	3.0
Diclorometano	5.91	1.97
Metanólico	12.76	4.25

Fuente: elaboración propia con datos experimentales de este estudio.

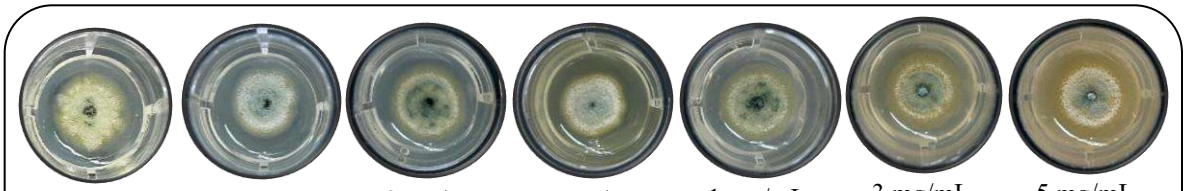
Porcentajes de inhibición de los extractos

En el estudio de sensibilidad de las tres cepas fúngicas frente a los extractos metanólicos de hojas y pétalos, evaluados a concentraciones de 1, 3 y 5 mg/mL, se observó que las dos cepas del género *Penicillium* spp. (aisladas de frutos de papaya y plátano), no presentaron una inhibición uniforme del crecimiento micelial (Figura 1 y 2).



Fuente: elaboración propia con datos experimentales de este estudio.

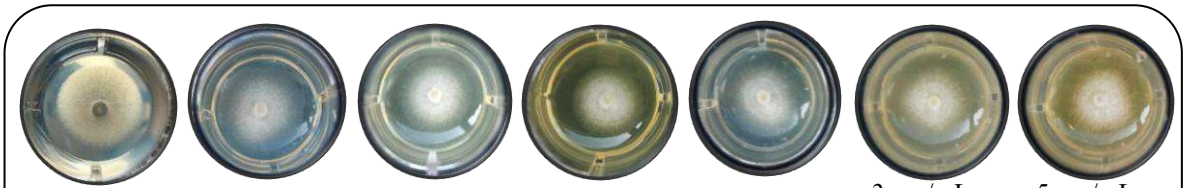
Figura 1. Placas correspondientes a la evaluación de la actividad antifúngica del extracto metanólico de hojas (izquierda) y pétalos (derecha) de *Magnolia mexicana* a la cepa de *Penicillium* spp. (aislado de frutos de papaya) a los tres días post-inoculación.



Fuente: elaboración propia con datos experimentales de este estudio.

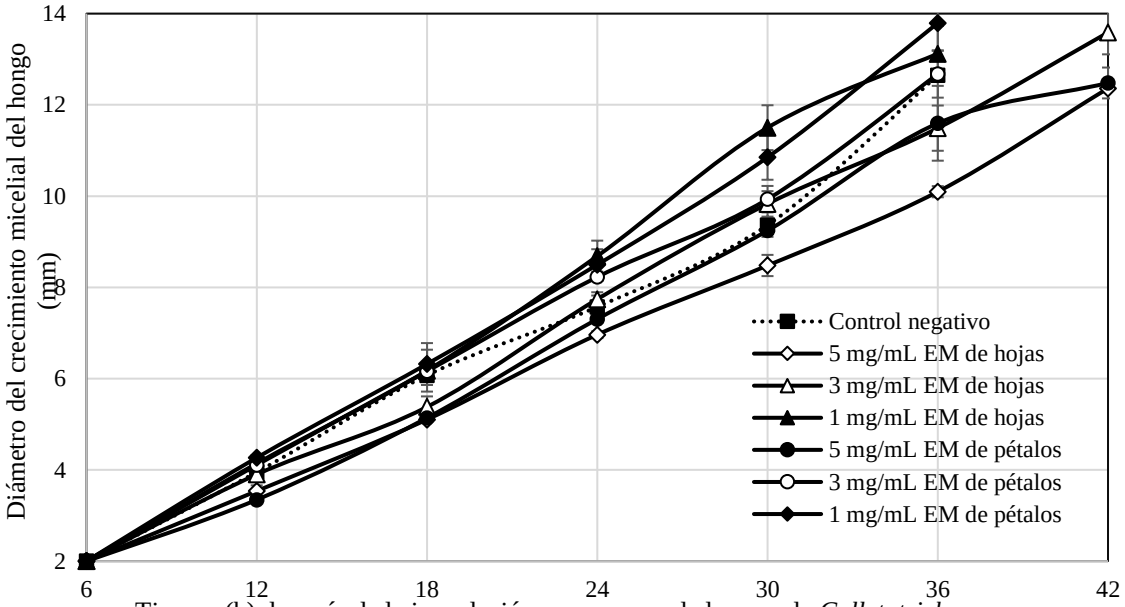
Figura 2. Placas correspondientes a la evaluación de la actividad antifúngica del extracto metanólico de hojas (izquierda) y pétalos (derecha) de *Magnolia mexicana* a la cepa de *Penicillium* spp. (aislado de frutos de plátano) a los tres días post-inoculación.

Asimismo, no se evidenció un efecto dosis-respuesta claro, ya que el incremento en la concentración del extracto no se tradujo en una mayor inhibición del crecimiento (Figura 1 y 2). En contraste, la cepa de *Colletotrichum* spp. (aislada de frutos de guayaba) mostró un comportamiento diferente, observándose un efecto dosis-respuesta más evidente con el extracto metanólico de hojas (Figura 3 y 4). 1 mg/mL (sin inhibición, efecto hormesis), 3 mg/mL (9.16 ± 3.91 %) y 5 mg/mL (20.18 ± 0.96 %) a las 36 h después de inoculación. Con base en estos resultados, se decidió continuar la evaluación utilizando los extractos de metanol y diclorometano obtenidos a partir de las hojas, incrementando el intervalo de concentraciones con el propósito de determinar con mayor precisión su efecto inhibitorio sobre el crecimiento del hongo.



Fuente: elaboración propia con datos experimentales de este estudio.

Figura 3. Placas correspondientes a la evaluación de la actividad antifúngica del extracto metanólico de hojas (izquierda) y pétalos (derecha) de *Magnolia mexicana* a la cepa de *Colletotrichum* spp. (aislado de frutos de guayaba) a los dos días post-inoculación.



Tiempo (h) después de la inoculación con esporas de la cepa de *Colletotrichum* spp.
Los datos representan la media ± desviación estándar (n=3)
Fuente: elaboración propia con datos experimentales de este estudio.

Figura 4. Cinética de crecimiento micelial *in vitro* de *Colletotrichum* spp. utilizando diferentes concentraciones del extracto metanólico (EM) de hojas y pétalos de *Magnolia mexicana*.

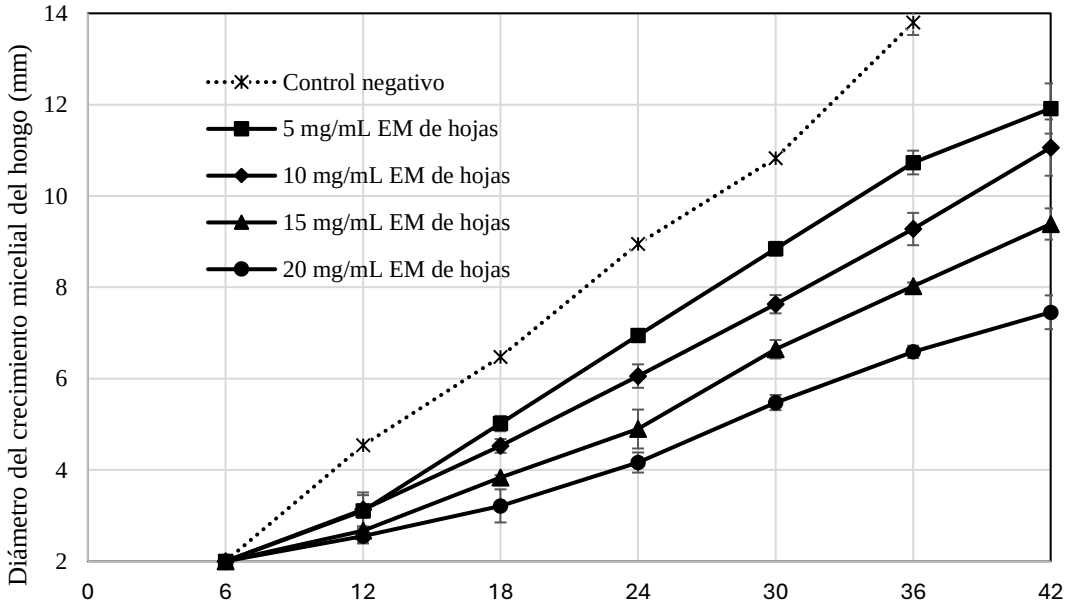
En la evaluación de la actividad antifúngica del extracto metanólico se observó que hay una relación positiva en la dosis aplicada en el extracto y la respuesta en la inhibición del crecimiento del micelio como se observa en la Figura 5 y 6.



Control negativo 5 mg/mL 10 mg/mL 15 mg/mL

Fuente: elaboración propia con datos experimentales de este estudio.

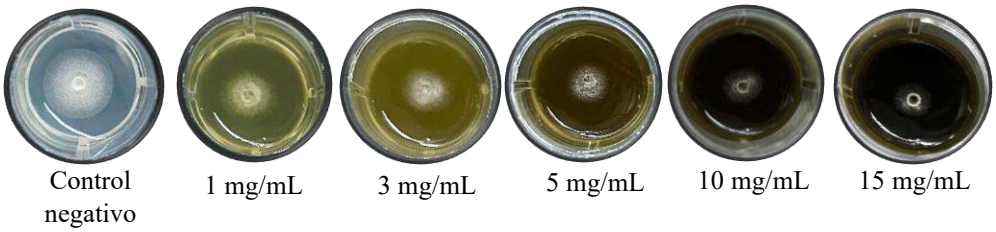
Figura 5. Placas correspondientes a la evaluación de la actividad antifúngica del extracto metanólico de hojas de *Magnolia mexicana* a la cepa de *Colletotrichum* spp. (aislado de frutos de guayaba) a concentraciones (5, 10 y 15 mg/mL) a los 24 h post-inoculación.



Tiempo (h) después de la inoculación con esporas de la cepa de *Colletotrichum* spp. Los datos representan la media ± desviación estandar (n=3).
Fuente: elaboración propia con datos experimentales de este estudio.

Figura 6. Cinética de crecimiento micelial *in vitro* de *Colletotrichum* spp. utilizando diferentes concentraciones del extracto metanólico (EM) de hojas *Magnolia mexicana*.

En la evaluación de la actividad antifúngica del extracto diclorometano contra la cepa de *Colletotrichum* spp. se observó en todas las concentraciones evaluadas que se obtuvo una inhibición del crecimiento micelial.



Fuente: elaboración propia con datos experimentales de este estudio.

Figura 7. Placas correspondientes a la evaluación de la actividad antifúngica del extracto de diclorometano de hojas de *Magnolia mexicana* a la cepa de *Colletotrichum* spp. (aislado de frutos de guayaba) a concentraciones (1,3, 5, 10 y 15 mg/mL) a las 24 h post-inoculación.

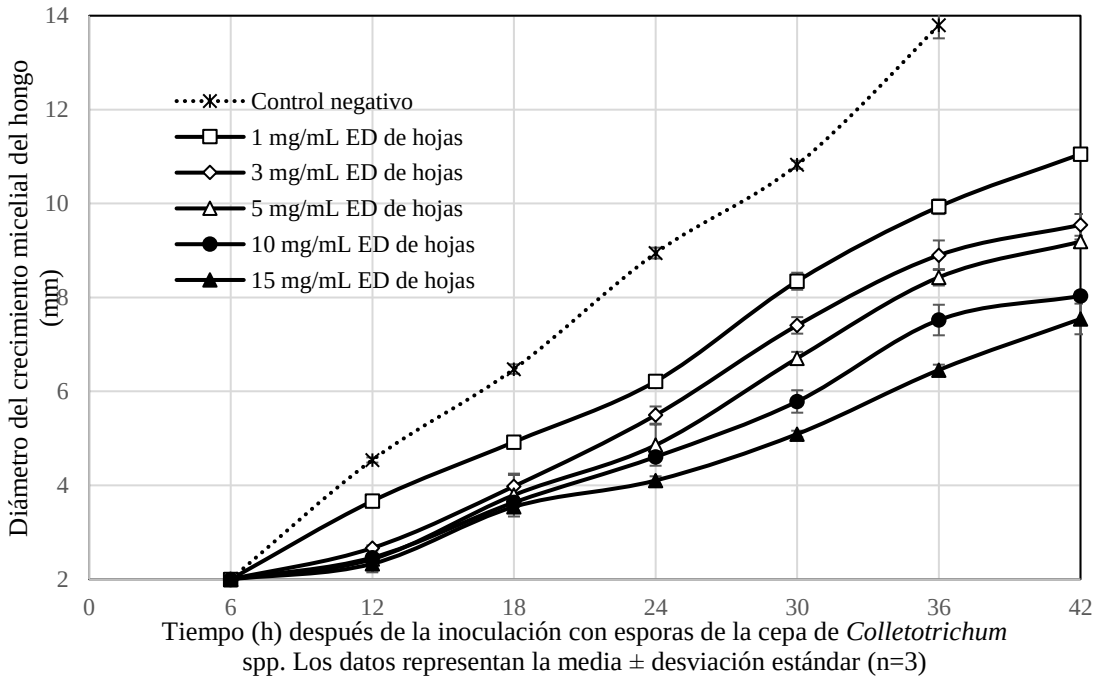


Figura 8. Cinética de crecimiento micelial *in vitro* de *Colletotrichum* spp. utilizando diferentes concentraciones del extracto de diclorometano (ED) de hojas *Magnolia mexicana*.

A las 36 h de incubación se observó una respuesta dependiente de la concentración en ambos extractos. Sin embargo, el extracto de diclorometano presentó un mayor porcentaje de inhibición del crecimiento micelialque el extracto metanólico en todas las concentraciones evaluadas. A 15 mg/mL el extracto de diclorometano alcanzó una inhibición de 53.19 %, mientras que el extracto metanólico registró una inhibición de 41.81 % (Cuadro 2). A pesar de que el rendimiento de extracción del extracto de diclorometano (1.75 %) fuera menor respecto al extracto metanólico (4.41 %), este disolvente favoreció la extracción de metabolitos con mayor actividad antifúngica.

Los resultados obtenidos coinciden con Yan et al. (2020), quienes observaron que los extractos menos polares de *Magnolia officinalis* presentaron mayor actividad antifúngica que los extractos más polares, mediante fraccionamiento dirigido aislaron de estos extractos neolignanos como honokiol y magnolol, identificándolos como los principales compuestos bioactivos.

De forma similar, Ahmed y Abdelgaleil (2005) reportaron que los extractos de diclorometano a partir de maceración de hojas (de donde se aislaron sesquiterpenos del tipo custonólido y partenólido) de *Magnolia grandiflora* presentaron una mayor inhibición del crecimiento de diversos hongos fitopatógenos que los extractos metanólicos.

El incremento gradual de la inhibición conforme aumentó la concentración del extracto evidencia una respuesta dosis-dependiente, comportamiento ámpliamente documentado para extractos vegetales con actividad antifúngica (Seepe et al., 2021). Además, el extracto metanólico presentó un efecto de hormesis a 1 mg/mL.

Cuadro 2. Porcentajes de inhibición del crecimiento micelial de *Colletotrichum* spp. del extracto metanólico y de diclorometano de hojas de Magnolia mexicana DC. a las 36 h post inoculación.

Extracto	Concentración (mg/mL)	Inhibición del crecimiento (%)
Metanólico (hojas)	1	Hormesis (0.0) i
	3	9.16 ± 3.91 h
	5	22.19 ± 1.88 g
	10	32.75 ± 2.56 ef
	15	41.81 ± 0.58 bc
Diclorometano (hojas)	1	27.99 ± 1.13 f
	3	35.48 ± 2.27 de
	5	38.89 ± 1.27 cd
	10	45.46 ± 2.35 b
	15	53.19 ± 0.82 a

Nota: los valores corresponden a la media ± desviación estandar (n=3). Medias con letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de acuerdo con la prueba

HSD de Tukey (α=0.05). Los tratamientos que comparten al menos una letra no presentan diferencias significativas. Fuente: elaboración propia con datos experimentales de este estudio.

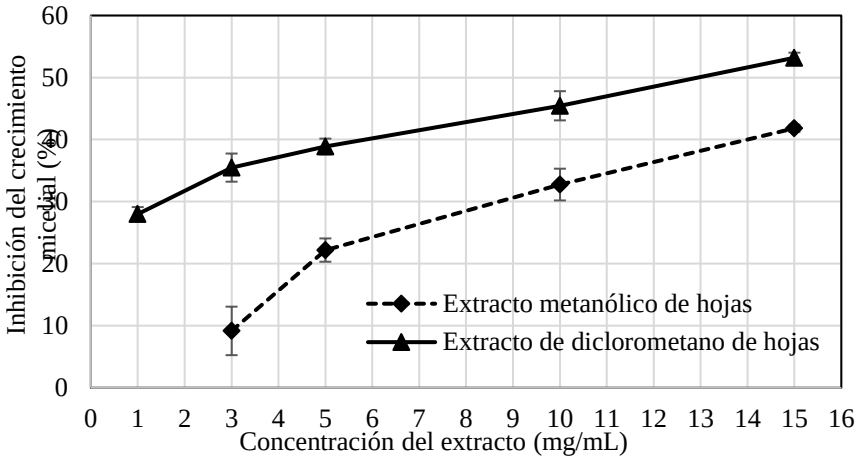


Figura 9. Interacción entre la concentración y el tipo de extracto sobre la inhibición del crecimiento micelial de *Colletotrichum* spp. a las 36 h post inoculación. Los puntos representan la media (n=3) y las barras de error corresponden a la desviación estándar.

Conclusiones

Los extractos metanólicos presentaron los mayores rendimientos de extracción tanto en hojas como en pétalos de *Magnolia mexicana*. Los extractos metanólicos de hojas y pétalos no mostraron una inhibición consistente frente a las cepas de *Penicillium* spp., mientras que *Colletotrichum* spp. presentó una respuesta dependiente de la concentración. El extracto de diclorometano de hojas mostró la mayor actividad antifúngica, alcanzando 53.19 % de inhibición del crecimiento micelial a 15 mg/mL, los resultados sugieren que los metabolitos de polaridad intermedia presentes en el extracto de diclorometano representan una fuente prometedora de compuestos bioactivos y justifican continuar los estudios para aislar e identificar los principios activos responsables de la actividad observada.

Literatura citada

Revistas

Ahmed, S. M., & Abdelgaleil, S. (2005). Antifungal activity of extracts and sesquiterpene lactones from *Magnolia grandiflora* L. (Magnoliaceae). *International Journal of Agriculture and Biology*, *7*(4), 638-642. https://www.fspublishers.org/paper/1856

Aldaba Núñez, F. A., Guzmán-Díaz, S., Martínez Salas, E. M., & Samain, M.-S. (2026). An updated infrageneric classification of Neotropical *Magnolia* (Magnoliaceae). *Acta Botánica Mexicana*, *133*, 1-35, e2545. https://doi.org/10.21829/abm133.2026.2545

Avendaño Reyes, S., & Acosta Rosado, I. (2000). Plantas utilizadas como cercas vivas en el estado de Veracruz. *Madera Y Bosques*, *6*(1), 55–71. https://doi.org/10.21829/myb.2000.611342

Caballero-Chávez, J. E., Paz-González, A. D., Navarrete-Carriola, D. V., Olazarán-Santibañez, F. E., Estevez-Carmona, M. M., Nogueda-Torres, B., Jiménez-Mondragón, F. E., Márquez-Aguilar, M. X., Pineda-Alcala, C. M., Cisneros-Juárez, D., Marín-Hernández, Á., Bandyopadhyay, D., & Rivera, G. (2025). Phytochemical Analysis and Appraisal of Antiproliferative Activity of Magnolia alejandrae. *Metabolites*, *15*(9), 567. https://doi.org/10.3390/metabo15090567

Chen, Y., Xing, M., Chen, T., Tian, S., & Li, B. (2023). *Effects and mechanisms of plant bioactive compounds in preventing fungal spoilage and mycotoxin contamination in postharvest fruits: A review*. *Food Chemistry, 415*, 135787. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135787

de Micheli-Serra, A. A., & Izaguirre-Ávila, R. (2014). On New Spain and Mexican medicinal botany in cardiology. *Revista de Investigación Clínica*, *66*(2), 194–199.

Dean, R., van Kan, J. A. L., Pretorius, Z. A., Hammond-Kosack, K. E., di Pietro, A., Spanu, P. D., Rudd, J. J., Dickman, M., Kahmann, R., Ellis, J., & Foster, G. D. (2012). The Top 10 fungal pathogens in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, *13*(4), 414–430. https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00783.x

Ghaffar, N., & Perveen, A. (2024). Solvent polarity effects on extraction yield, phenolic content, and antioxidant properties of Malvaceae family seeds: a comparative study. *New*

Zealand Journal of Botany, *63*(4), 627–637. https://doi.org/10.1080/0028825x.2024.2392705

Hernández, C. M. (1980). *Flora de Veracruz: Magnoliaceae* (Fascículo 14). Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. https://doi.org/10.21829/fv.474.1980.14

Hernández-Díaz, L., & Rodríguez-Jorge, M. (2001). Actividad antimicrobiana de plantas que crecen en Cuba. *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 6, 44–47.

Hernández-Rocha, J. V., & Vásquez-Morales, S. G. (2023). *The Potential of Magnolia spp. in the Production of Alternative Pest Control Substances*. *Molecules, 28*(12), 4681. https://doi.org/10.3390/molecules28124681

Hu, Y., Zhang, Z., Yong, Y., Zhang, M., Hu, X., Lei, W., & Zhang, D. (2026). Combined Metabolome and Transcriptome Analysis of Floral Organ Development in Magnolia cavaleriei var. platypetala 'Tanchun'. *Plants*, *15*(11), 1646. https://doi.org/10.3390/plants15111646

Huang, W.-Y., Cai, Y.-Z., & Zhang, Y. (2010). Natural phenolic compounds from medicinal herbs and dietary plants: potential use for cancer prevention. Nutrition and Cancer, 62(1), 1–20. https://doi.org/10.1080/01635580903191585

Iglesias-Guevara, D., & Sánchez-Torres, P. (2024). Characterization of antifungal properties of avocado leaves and majagua flowers extracts and their potential application to control *Alternaria alternata*. *International Journal of Food Microbiology*, *413*. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110579

Khwaza, V., & Aderibigbe, B. A. (2023). *Antifungal Activities of Natural Products and Their Hybrid Molecules*. *Pharmaceutics, 15*(12), 2673. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15122673

Negri, M., Salci, T. P., Shinobu-Mesquita, C. S., Capoci, I. R., Svidzinski, T. I., & Kioshima, E. S. (2014). Early state research on antifungal natural products. *Molecules*, *19*(3), 2925–2956. https://doi.org/10.3390/molecules19032925

Oliveira, M. M. A., Velázquez, D., & Bermúdez, A. (2005). La investigación etnobotánica sobre plantas medicinales: una revisión de sus objetivos y enfoques actuales. Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América, 30(8), 453–459.

Olvera, F. H. M., & Lindig-Cisneros, R. (2005). La lista de nombres vulgares y botánicos de árboles y arbustos propicios para repoblar los bosques de la República de Fernando Altamirano y José Ramírez a más de 110 años de su publicación. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *76*(1), 11–35.

Palacios, E. (2006). *Ficha técnica de Magnolia mexicana: Cuarenta y ocho especies de la flora de Chiapas incluidas en el PROY-NOM-059-ECOL-2000*. Instituto de Historia Natural y Ecología. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/ise/fichasnom/Talaumamexicana00.pdf

Rivers, M. C., Martínez-Salas, E., & Samain, M. S. (2016). *Magnolia mexicana*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2016*, e.T193977A2293105. https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2016-1.RLTS.T193977A2293105.en

Rodríguez Pava, C. N., Zárate Sanabria, A. G., & Sánchez Leal, L. C. (2017). Actividad antimicrobiana de cuatro variedades de plantas frente a patógenos de importancia clínica en Colombia. *Nova*, *15*(27), 119–129. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-24702017000100119

Salotti, I., Liang, Y. J., Ji, T., & Rossi, V. (2023). Development of a model for Colletotrichum diseases with calibration for phylogenetic clades on different host plants. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1069092. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1069092

Sánchez-Recillas, A., Mantecón-Reyes, P., Castillo-España, P., Villalobos-Molina, R., Ibarra-Barajas, M., & Estrada-Soto, S. (2014). Tracheal relaxation of five medicinal plants used in Mexico for the treatment of several diseases. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, *7*(3), 179–183. https://doi.org/10.1016/S1995-7645(14)60017-1

Seepe, H. A., Nxumalo, W., & Amoo, S. O. (2021). Natural Products from Medicinal Plants against Phytopathogenic Fusarium Species: Current Research Endeavours, Challenges and Prospects. *Molecules*, *26*(21), 6539. https://doi.org/10.3390/molecules26216539

Sepúlveda, J. G., Porta-Ducoing, H., & Rocha, S. M. (2003). La participación de los metabolitos secundarios en la defensa de las plantas. Revista Mexicana de Fitopatología, 21, 355–363.

Valentão, P., Fernandes, E., Carvalho, F., Andrade, P. B., Seabra, R. M., & Bastos, M. L. (2002). Antioxidative properties of cardoon (Cynara cardunculus L.) infusion against

superoxide radical, hydroxyl radical, and hypochlorous acid. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 50(17), 4989–4993.

Waizel, B. J. (2002). Uso tradicional e investigación científica de Talauma mexicana (D.C.) Don., o flor del corazón. Revista Mexicana de Cardiología, 13(1), 31–38.

Yan, Y., Yang, C., Shang, X., Zhao, Z., Liu, Y., Zhou, R., Liu, H., Wu, T., Zhao, W., Wang, Y., Hu, G., Qin, F., He, Y., Li, H., & Du, S. (2020). Bioassay-guided isolation of two antifungal compounds from *Magnolia officinalis*, and the mechanism of action of honokiol. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, *170*. 104705 https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104705

Yin, G., Zhao, S., Zhang, H., Pennerman, K. K., & Bennett, J. W. (2026). Recent advances in pathogenicity and biocontrol of postharvest *Penicillium* diseases. *Journal of Fungi*, *12*(3). https://doi.org/10.3390/jof12030219

Libros

Anand, G., & Rajeshkumar, K. C. (2022). Desafíos y amenazas que plantean los hongos fitopatógenos para la productividad y la economía agrícolas. En V. R. Rajpal, I. Singh, & S. S. Navi (Eds.), *Diversidad, ecología y control de hongos* (pp. 483–493). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8877-5_23

Tesis

Medrano-Hernández, J. M., Rodríguez de la O, J. L., Reyes-Trejo, B., Peña Ortega, M. G., & Guerra-Ramírez, D. (2017). *Respuestas morfogénicas in vitro y caracterización fitoquímica y molecular de yoloxochilt (Magnolia mexicana)* [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio Institucional.

Incidencia y progresión del manchado sectorial en *Citrus latifolia* y *Citrus sinensis* bajo condiciones de invernadero en Quintana Roo, México

César Antonio Casasola-Elizondo[31] y José Ángel García-Sandoval

Resumen

La citricultura en el sur de Quintana Roo enfrenta retos climáticos que pueden potenciar desórdenes fisiológicos como el manchado sectorial, una alteración quimérica-fisiológica que deteriora el sistema vascular de las plantas. Motivo por el cual el objetivo del presente trabajo fue evaluar la dinámica temporal de la incidencia de manchado sectorial en *Citrus latifolia* y *Citrus sinensis* bajo condiciones de invernadero en la zona sur de Quintana Roo. Se realizó un estudio observacional comparativo con medidas repetidas en el tiempo durante el ciclo anual 2025. Se evaluaron 85 plantas comerciales divididas por especie: *C. latifolia* (n = 55) y *C. sinensis* (n = 30). Los datos de presencia y ausencia del desorden se registraron de forma individual en cuatro fechas de muestreo. El progreso temporal de la incidencia se analizó mediante la Prueba de Q de Cochran, mientras que la comparación interespecífica se realizó con la Prueba Exacta de Fisher ($p < 0.05$). El análisis estadístico reveló un comportamiento contrastante y significativo entre las especies. En *C. latifolia*, la incidencia aumentó de forma progresiva y significativa a través del tiempo ($p < 0.001$), iniciando con un 54.5 % en marzo hasta alcanzar el 100 % en diciembre. Al final del periodo de evaluación, se registró una mortalidad acumulada de 9.09 % en esta población. Por el contrario, *C. sinensis* demostró tolerancia manteniendo una incidencia del 0.0 % y nula mortalidad durante todo el periodo evaluado ($p > 0.05$). La Prueba Exacta de Fisher confirmó diferencias estadísticas significativas ($p < 0.0001$) entre ambas especies en cada fecha de muestreo. La evaluación demostró un marcado contraste en la susceptibilidad al manchado sectorial bajo las condiciones de invernadero de la región. Mientras *C. latifolia* evidenció una alta vulnerabilidad con un progreso acelerado y letal, *C. sinensis* no mostró sintomas al desorden fisiológico durante el experimento.

Palabras clave: Wood pocket, desorden fisiológico, limón persa.

Abstract

[31] Instituto Nacional de Investigación Forestal Agrícola y Pecuaria – Campo Experimental Chetumal. Carretera Chetumal-Bacalar km 25, Xul-Ha, Quintana Roo, México. CP 77963. Correo: casasola.cesar@inifap.gob.mx , garcia.angel@inifap.gob.mx

Citrus production in southern Quintana Roo faces climatic challenges that can trigger physiological disorders such as sectorial spotting a chimeric-physiological alteration that deteriorates the plant vascular system. Therefore , the objetive was to evaluate the temporal dynamics of the incidence of sectorial spotting in *Citrus latifolia* and *Citrus sinensis* under greenhouse conditions in southern Quintana Roo. An observational comparative study with repeated measures over time was conducted during the 2025 annual cycle. A total of 85 commercial plants were evaluated, divided by species: *C. latifolia* (n = 55) and *C. sinensis* (n = 30). Presence and absence data for the disorder were individually recorded across four sampling dates. The temporal progress of the incidence was analyzed using Cochran's Q test, while the interspecific comparison was performed using Fisher's Exact test ($p < 0.05$). Statistical analysis revealed a contrasting and significant behavior between species. In *C. latifolia*, incidence increased progressively and significantly over time ($p < 0.001$), starting at 54.5 % in March and reaching 100 % in December. This severe progression induced a final mortality rate of 9.09 % in this population. Conversely, *C. sinensis* showed no detectable symptoms, maintaining a 0.0 % incidence and zero mortality throughout the entire evaluation period ($p > 0.05$). Fisher's Exact test confirmed significant statistical differences ($P < 0.0001$) between both species on each sampling date. The evaluation demonstrated a marked contrast in susceptibility to sectorial spotting under the region's greenhouse conditions. While *C. latifolia* evidenced high vulnerability with an accelerated and lethal progression, *C. sinensis* showed no symptoms of the physiological disorder during the experiment.

Keywords: Wood pocket, physiological disorder, persian lime.

Introducción

La citricultura es una de las actividades agrícolas de mayor relevancia a nivel mundial, con una producción que supera los 150 millones de toneladas anuales (FAOSTAT, 2026). En este escenario, México se posiciona como el principal productor y exportador de lima Persa (*Citrus latifolia* Tanaka), destacando estados como Veracruz, Oaxaca y Yucatán por su volumen de cosecha y valor comercial (SIAP, 2026). Sin embargo, la sostenibilidad de este sector se encuentra amenazada por diversos factores de estrés. Entre los de tipo biótico, destacan el Huanglongbing (HLB; dragón amarillo), la leprosis, así como los fitopatógenos regulados por la NOM 079 FITO 2002 como el virus de la tristeza de los cítricos (VTC), la exocortis, la psorosis y la cachexia, considerados de importancia cuarentenaria (SAGARPA, 2002). Por otro lado, dentro de los factores abióticos, destaca el manchado sectorial (*Wood pocket*), una fisiopatía de naturaleza genética y ambiental que compromete la vida productiva de los huertos.

El manchado sectorial fue descrito en la década de 1940 en California y Florida, donde su impacto fue tan devastador que llegó a colapsar la industria de la lima Tahití antes de que se seleccionaran materiales tolerantes. En la actualidad, este desorden ha reemergido con fuerza en regiones tropicales y subtropicales de México, Colombia y el Medio Oriente. A diferencia de las enfermedades infecciosas, el manchado sectorial es una anomalía no transmisible propia de la constitución genética de la mayoría de los clones de lima Persa y limones. Su sintomatología es compleja e incluye moteado clorótico irregular en las hojas, quimeras amarillas longitudinales en los frutos y una tinción oscura en el xilema que evidencia un colapso vascular sistémico (OIRSA, 2021).

Desde una perspectiva fisiológica, el desarrollo del manchado sectorial está ligado al estrés térmico y al déficit hídrico. Estudios recientes sugieren que el calor extremo actúa de manera directa e incrementa el desarrollo de síntomas en el tronco y frutos así como la tasa de mortalidad de los árboles (USDA ARS, 2026). Este calor extremo induce una acumulación de ácido abscísico (ABA), lo que provoca un cierre estomático severo y la degradación de pigmentos fotosintéticos.

De manera simultánea, la alta demanda atmosférica fuerza el sistema de transporte de la planta, causando un fallo vascular por cavitación y ruptura de las traqueidas en el xilema, lo que impide el flujo masivo de agua y nutrientes hacia la parte aérea, resultando en una muerte descendente progresiva.

A pesar de su gravedad, no existen tratamientos químicos efectivos para el manchado sectorial, por lo que la principal estrategia de manejo es la selección de materiales vegetales tolerantes. Mientras que *Citrus latifolia* ha demostrado ser muy vulnerable, otras especies comerciales como la naranja dulce (*Citrus sinensis*) han sido referidas como materiales que no expresan la sintomatología clásica del colapso vascular asociado a este desorden. Dado que los patrones tienen impacto nulo o muy bajo en detener el manchado sectorial, la estrategia de manejo definitiva no radica en el portainjerto. Por tanto, la propagación certificada se vuelve fundamental, requiriendo la adquisición de varetas provenientes de árboles madre certificados que hayan sido evaluados en zonas de altas temperaturas sin manifestar síntomas (Mohamed; 2014; Siebert *et al*., 2010). No obstante, existe poca información científica que compare la dinámica temporal de esta fisiopatía entre ambas especies bajo condiciones de estrés ambiental controlado.

Por lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la dinámica temporal de la incidencia de manchado sectorial en *Citrus latifolia* y *Citrus sinensis* bajo condiciones de invernadero en la zona sur de Quintana Roo. Se busca determinar si existen diferencias en la

expresión y progresión del manchado sectorial entre ambas especies bajo las condiciones ambientales evaluadas.

Materiales y Métodos

Ubicación y material vegetal

La investigación se realizó dentro de un invernadero con cubierta de plástico y malla antiáfidos de 500 m^2 perteneciente al Campo Experimental Chetumal - CIRSE INIFAP, Quintana Roo. El material vegetal evaluado consiste en 55 plantas de *Citrus latifolia* y 30 plantas de *Citrus sinensis* de 2.5 años de edad injertadas sobre el portainjerto de *Citrus volkameriana*, utilizando yemas provenientes de la Estación Nacional de Epidemiología Cuarentena y Saneamiento Vegetal de Querétaro.

Manejo agronómico del experimento

Los brotes no deseados (chupones) y las ramas se eliminan con tijeras de podar clásica utilizando un producto desinfectante timsen a una dosis de 2mg L^{-1} de manera constante entre cada corte y de manera obligatoria entre cada planta. Se aplican riegos tres veces por semana durante 20 min, los cambios de trampas amarillas se realizan cada quince días, cada tres meses se hace una aplicación de 15 g por planta de fertilizante granular 12-8-16+(3MgO + TE).

Variables respuesta

Incidencia del manchado sectorial: Se registro como una variable cualitativa de tipo nominal binaria. Se evaluó de forma individual mediante la inspección visual de los síntomas característicos en cada planta. Se asignó el valor de 1 para la presencia del desorden fisiológico y 0 para su ausencia.

Factor temporal (tiempo): Definido por cuatro fechas de muestreo consecutivas cada tres meses durante el año 2025.

Factor interespecífico (especie): Variable categórica con dos niveles correspondientes a las especies de cítricos comerciales evaluadas*: Citrus latifolia* y *Citrus sinensis*.

Diseño experimental y análisis estadístico

El estudio se desarrolló bajo un enfoque observacional comparativo, estructurado como un análisis de medidas repetidas en el tiempo. Se evaluó el comportamiento de dos especies de cítricos comerciales (*Citrus latifolia*, n=55; y *Citrus sinensis*, n=30) como grupos de comparación naturales. Las unidades experimentales fueron monitoreadas de forma longitudinal en cuatro fechas consecutivas durante el ciclo 2025 para registrar la incidencia binaria del manchado sectorial.

Para el análisis estadístico, los datos se analizaron como variables cualitativas nominales binarias (presencia o ausencia del desorden). Los análisis involucraron dos enfoques. Evolución a través del tiempo medida a través de la prueba de Q de Cochran para determinar si existen cambios significativos en la incidencia del desorden a lo largo de las cuatro fechas de muestreo en cada especie por separado. Comparación entre especies. Se utilizó la prueba exacta de Fisher para comparar la incidencia del desorden entre *C. latifolia* y *C. sinensis* en cada una de las fechas de evaluación específicas. Todos los análisis estadísticos se consideraron significativos con un valor de $P<0.05$. El análisis estadístico se llevó a cabo con el Software SAS OnDemand for Academics (SAS Institute Inc., USA).

Resultados y discusión

El análisis estadístico reveló un comportamiento contrastante y significativo en el progreso del manchado sectorial entre las dos especies evaluadas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Dinámica temporal de la incidencia (%) de manchado sectorial en dos especies de cítricos comerciales.

Especie	Plantas (n)	03/2025	06/2025	09/2025	12/2025	Valor de P (temporal) [1]
Citrus latifolia	55	54.5%(30)	67.3%(37)	74.5%(41)	100 % (55)	*p<0.001*
Citrus sinensis	30	0.0 % (0)	0.0 % (0)	0.0 % (0)	0.0 % (0)	*NS*
Valor de P (interespecífico) [2]		*p<0.0001*	*p<0.0001*	*p<0.0001*	*p<0.0001*	

NS = no significativo (p>0.05). Letras minúsculas distintas en la misma fila indican diferencia significativa a través del tiempo. [1]Valor de p calculado mediante la Prueba de Q de Cochran para evaluar el progreso del desorden fisiológico a través de las fechas. [2] Valor de p calculado mediante la Prueba exacta de Fisher para comparar la incidencia entre ambas especies en cada fecha específica.

En *Citrus latifolia*, la incidencia del desorden fisiológico mostró un incremento progresivo y estadísticamente significativo a lo largo del tiempo (Cochran, $p < 0.001$). El monitoreo inició en marzo con un 54.5 % de plantas afectadas (30 de 55) y avanzó de manera gradual durante el año, alcanzando el 100 % de la incidencia en la evaluación final de diciembre (55 de 55). Este hallazgo confirma que el manchado sectorial es un desorden genéticamente inherente a la mayoría de los clones de limón persa (Ríos-Rojas *et al*., 2018). El avance acelerado hacia el cierre del ciclo anual se explica por la exposición prolongada a factores ambientales estresantes dentro del invernadero, ya que se ha documentado que temperaturas superiores a los 45 °C disparan la expresión de síntomas de forma drástica (Flores – de la Rosa *et al*., 2025).

Por el contrario, *Citrus sinensis* se mantuvo libre del desorden fisiológico durante todo el periodo evaluado. Registró una incidencia constante del 0.0 % (0 de 30) en las cuatro fechas de muestreo, sin presentar variaciones temporales significativas (NS, $p > 0.05$). Esta tolerancia demuestra que, a diferencia de limón persa, la naranja dulce no porta la predisposición genética para este colapso vascular específico bajo las mismas condiciones de estrés térmico (Rodríguez – Polanco et al., 2020).

La comparación interespecífica confirmó que la susceptibilidad al manchado sectorial es dependiente de la especie. La Prueba Exacta de Fisher demostró diferencias estadísticas significativas ($p < 0.0001$) entre *Citrus latifolia* y *Citrus sinensis* para cada una de las fechas evaluadas.

Estos resultados evidencian una tolerancia de *Citrus sinensis* bajo las condiciones observadas, frente a una severa y acelerada dispersión temporal de los síntomas en *Citrus latifolia*.

El Cuadro 2 revela un impacto diferencial del manchado sectorial, con *Citrus latifolia* mostrando un 9.09 % de mortalidad asociado a síntomas avanzados (Figura 1), mientras que *Citrus sinensis* presentó un 0.00 % de mortalidad y nula incidencia. Coincidiendo con Rodríguez – Polanco et al. (2020) quienes mencionan que, desde el punto de vista fisiológico, la muerte de los ejemplares de limón persa en la etapa terminal se debe a un fallo vascular sistémico provocado por la cavitación y ruptura de las traqueidas en el xilema. Ante la alta demanda atmosférica y el déficit hídrico, la planta realiza un esfuerzo excesivo por capturar agua, lo que fractura el sistema de transporte e impide que los nutrientes lleguen a la parte aérea.

Cuadro 2. Estado de vitalidad y tasa de mortalidad final en plantas de cítricos expuestas a manchado sectorial.

Especie	Plantas vivas	Plantas muertas	Mortalidad total (%)
Citrus latifolia (Limón persa)	50	5	9.09 %
Citrus sinensis (Naranja dulce)	30	0	0.00 %

a) b) c)



Figura 1. a) Muerte descendente crónica, b) colapso total de la planta y c) tejido necrótico en xilema

Conclusiones

La evaluación de la incidencia de manchado sectorial en la zona sur de Quintana Roo demostró un comportamiento contrastante entre especies; mientras que *Citrus latifolia* evidenció una alta susceptibilidad con un progreso temporal significativo que alcanzó el 100% de plantas afectadas al final del ciclo, *Citrus sinensis* no presentó síntomas durante el periodo de evaluación bajo condiciones de invernadero.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Quintanarroense de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (COQHCYT) y al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el apoyo financiero e institucional que hicieron posible la realización de esta investigación.

Literatura citada

FAOSTAT. (2026). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL.

Flores-de la Rosa, F. R., Fuentes-Ortíz, G., Santillán-Mendoza, R., Matilde-Hernández, C., Estrella-Maldonado, H., & Santamaría, J. M. (2025). Understanding the wood pocket physiopathy in Persian lime through its physiological characterization. *Agronomy*, *15*(4), Artículo 762. https://doi.org/10.3390/agronomy15040762

México. SAGARPA (actualidad SADER). (2002). Norma Oficial Mexicana. NOM-079-FITO-2002. Diario Oficial de la Federación, 22 de mayo de 2002. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=733575

Mohamed, M. E. (2014). A Note on Wood Pocket Disease of Lime on Bearss Lime (*Citrus latifolia* Tan.) in Shambat, Khartoum State, Sudan. *University of Khartoum Journal of Agricultural Sciences*, *22*(2), 332–337. https://doi.org/10.53332/uofkjas.v22i2.1817

OIRSA (2021). *Guía de campo para el reconocimiento de wood pocket en limón persa en la región del OIRSA*. Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria. https://www.oirsa.org/contenido/2020-2/2021/Manual%20Wood%20pocket.pdf

Ríos-Rojas, L., Correa, J. F., Rojas-Marín, C. A., & Dorado-Guerra, D. Y. (2018). Edaphoclimatic characterization of the productive zone of Tahiti lime (*Citrus latifolia* Tanaka) in Tolima (Colombia) affected by a physiopathy. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, *19*(3), 569–591. https://doi.org/10.21930/rcta.vol19_num3_art:862

Rodríguez-Polanco, E., García, J., & Orduz, J. (2020). Desempeño de la fotosíntesis y disminución en el potencial hídrico de las hojas de Lima Tahití afectadas por Wood pocket. *Temas Agrarios*, *25*(2), 153–165. https://doi.org/10.21897/rta.v25i2.2295

SIAP. 2026. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/ .

Siebert, T., Krueger, R., Kahn, T., Bash, J., y Vidalakis, G. (2010). Descriptions of new varieties recently distributed from the Citrus Clonal Protection Program. *Citrograph*, *1*(1), 20–26. https://citrusvariety.ucr.edu/sites/default/files/2022-04/siebert_etal_2010_ccpp_new_varieties_citrographmarchapril2010.pdf

USDA ARS (2026). *Genetic and physiological disorders of citrus: Wood pocket overview*. Agricultural Research Service Publications, United States Department of Agriculture. (Seq No. 253555)

Influencia del inicio del control químico sobre la fluctuación poblacional de *Anthonomus eugenii* en chile Miahuateco, Santiago Miahuatlán, Puebla

Diana Fernanda Espinoza Castillo[32]; Agustín Aragón García[33]; Gabriel Antonio Lugo García; Betzabeth Cecilia Pérez Torres

Resumen

El momento en que se inicia el control químico puede ser determinante para el control del picudo del chile (*Anthonomus eugenii* Cano); sin embargo, existe poca evidencia de campo sobre cómo esta decisión influye en su fluctuación poblacional. El objetivo del presente estudio fue comparar la captura de adultos de *A. eugenii* bajo dos esquemas en el momento de iniciar el control químico del picudo del chile, en parcelas comerciales de chile Miahuateco, establecidas durante los ciclos agrícolas 2025 y 2026 en Santiago Miahuatlán, Puebla. La población de adultos se monitoreó mediante trampas con feromonas Pherocon PEW®, registrando las capturas mensuales de abril a junio. La información se analizó de forma descriptiva mediante comparación gráfica y cálculo de diferencias porcentuales entre ciclos. En ambos años se observó un incremento progresivo en la captura de adultos conforme avanzó el cultivo; sin embargo, cuando las aplicaciones iniciaron antes de la floración, las capturas fueron entre 71.0 y 78.7 % menores respecto al ciclo donde el control comenzó con 20-30% de floración. Este comportamiento sugiere que intervenir antes de que el cultivo presente mayor disponibilidad de estructuras reproductivas podría reducir la población adulta antes de que ocurran condiciones favorables para la oviposición y el establecimiento de nuevas generaciones. Los resultados indican que la oportunidad de intervención constituye un componente relevante para fortalecer el control del picudo del chile.

Palabras clave: Trampas con feromona, Fenología del cultivo, Monitoreo y Oportunidad de intervención

Abstract

The timing of chemical control initiation may be a determining factor in the management of the pepper weevil (*Anthonomus eugenii* Cano); however, there is limited field evidence on

[32] Facultad de Agricultura del Valle del Fuerte, Colegio de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma de Sinaloa, Calle 16 y Avenida Japaraqui, 81110 Juan José Ríos, Ahome, Sinaloa, México. Correos electrónicos: dianaespinozacastillo@gmail.com; gabriel_lugo@uas.edu.mx

[33] Centro de Agroecología, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, EcoCampus Valsequillo, Edificio VAL 1, Km 1.7 carretera San Baltazar Tetela, 72570 San Pedro Zacachimalpa, Puebla, México. Correos electrónicos: agustin.aragon@correo.buap.mx; betzabeth.perez@correo.buap.mx

how this decision influences its population fluctuation. The objective of this study was to compare adult captures of *A. eugenii* under two different timings of chemical control initiation in commercial Miahuateco pepper fields established during the 2025 and 2026 growing seasons in Santiago Miahuatlán, Puebla, Mexico. Adult populations were monitored using Pherocon PEW® pheromone traps, and captures were recorded monthly from April to June. Data were analyzed descriptively through graphical comparison of population fluctuation and calculation of percentage differences between growing seasons. In both years, adult captures increased progressively as the crop developed; however, when insecticide applications were initiated before flowering, captures were 71.0–78.7% lower than in the cycle where chemical control began at 20–30% flowering. These findings suggest that intervening before the crop develops a greater availability of reproductive structures may reduce the adult population before conditions become favorable for oviposition and the establishment of new generations. The results indicate that the timing of intervention represents a relevant component for strengthening pepper weevil control.

Key words: Pheromone traps, Crop phenology, Monitoring, Timing of intervention.

Introducción

El control del picudo del chile (*Anthonomus eugenii* Cano) representa un reto fitosanitario para los productores, debido a que el daño inicia desde las estructuras reproductivas del cultivo y gran parte del desarrollo del insecto ocurre dentro de botones florales y frutos. Esta característica dificulta su control, ya que los huevos y larvas permanecen protegidos dentro del tejido vegetal y tienen menor exposición directa a los insecticidas; por ello, las estrategias de control se enfocan principalmente en detectar y controlar a los adultos antes de que ocurra la oviposición (Riley *et al*., 1992; Fernández *et al*., 2020).

En este contexto, el control químico sigue siendo una de las herramientas más utilizadas para el control de *A. eugenii* en campo. Sin embargo, su eficacia no depende únicamente del producto aplicado, sino también del momento en que se inicia el control, así como, por la cobertura de aplicación y el seguimiento de la fluctuación poblacional de la plaga. Por esta razón, el monitoreo mediante trampas con feromona permite detectar la presencia de adultos y tomar decisiones antes de que las poblaciones se establezcan en el cultivo (Fernández *et al*., 2020).

Aunque existen recomendaciones técnicas para iniciar el control cuando se detectan los primeros adultos o durante las primeras etapas reproductivas del cultivo, todavía es limitada la información de campo que compara cómo diferentes momentos de inicio del control

químico se relacionan con la fluctuación poblacional del picudo del chile. Generar esta información puede aportar criterios prácticos para mejorar la oportunidad de intervención y fortalecer las estrategias de control del picudo del chile. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue comparar la captura de adultos de *A. eugenii* bajo dos esquemas en el momento de iniciar el control químico del picudo del chile, en parcelas comerciales de chile Miahuateco.

Materiales y métodos

El estudio se realizó durante los ciclos agrícolas 2025 y 2026 en parcelas comerciales de chile Miahuateco (*Capsicum annuum* L.) ubicadas en el municipio de Santiago Miahuatlán, Puebla, México. En el ciclo 2025, el cultivo se estableció en un predio localizado en las coordenadas 18.534740 N, -97.444629 O, mientras que en el ciclo 2026 el monitoreo se realizó en un predio cercano (18.532533 N, -97.446904 O), ambos representativos de la zona de producción de chile Miahuateco. El trasplante se realizó el 15 de febrero de 2025 y el 19 de febrero de 2026, respectivamente.

La fluctuación poblacional de adultos del picudo del chile (*A. eugenii*) se monitoreó mediante trampas comerciales Pherocon PEW ®, diseñadas específicamente para la captura de adultos de esta especie. En cada ciclo agrícola se colocó una trampa en la parcela de muestreo, la cual fue reemplazada mensualmente durante el periodo de evaluación. Las capturas se registraron de abril a junio de cada año, contabilizando el número de adultos presentes en cada trampa al momento del recambio.

Durante ambos ciclos agrícolas, el cultivo fue manejado bajo prácticas convencionales realizadas por el productor. En ambos ciclos se utilizaron los mismos insecticidas (imidacloprid + betacyflutrin y betacyflutrin), con iguales dosis, frecuencia y número de aplicaciones. La única diferencia entre los esquemas evaluados correspondió al momento de inicio del control químico contra A. eugenii. En el ciclo 2025, las aplicaciones iniciaron cuando el cultivo presentaba aproximadamente entre 20 y 30 % de floración, mientras que en el ciclo 2026 comenzaron antes del inicio de la floración.

Debido a que el objetivo del estudio fue comparar el comportamiento poblacional del picudo del chile entre dos ciclos agrícolas con diferente momento de inicio de control químico, los datos se analizaron de forma descriptiva. Para ello se comparó el número mensual de adultos capturados durante el periodo de evaluación mediante una representación gráfica de la fluctuación poblacional entre ambos ciclos agrícolas, complementada con el cálculo de las diferencias porcentuales en las capturas registradas por cada mes. No se realizaron pruebas

estadísticas inferenciales debido a que el monitoreo correspondió a una trampa por sitio de evaluación y los registros se analizaron como datos descriptivos de captura mensual.

Resultados y discusión

La captura de adultos de *A. eugenii* mostró un comportamiento contrastante en los ciclos agrícolas evaluados (Figura 1). Durante 2025, las capturas aumentaron de manera progresiva conforme avanzó el periodo de monitoreo; en cambio, durante 2026 los registros se mantuvieron en niveles menores durante los mismos meses de evaluación.

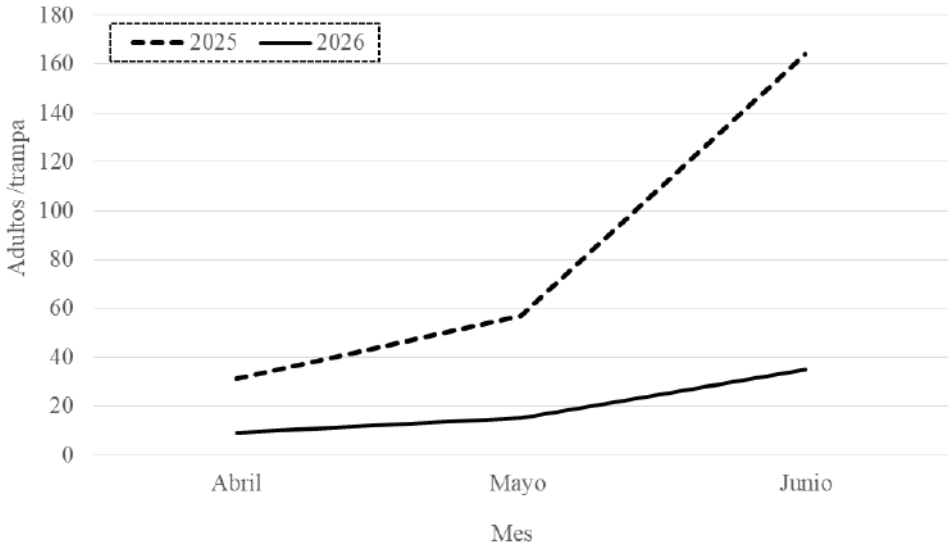


Figura 1. Fluctuación poblacional de adultos de *Anthonomus eugenii* capturados mediante trampa Pherocon PEW® durante los ciclos agrícolas 2025 y 2026 en chile Miahuateco, en Santiago Miahuatlán, Puebla.

Fuente: Elaboración propia con datos de campo de los ciclos agrícolas 2025 y 2026.

Este patrón se observó desde abril y se mantuvo hasta junio. En términos descriptivos, las capturas registradas durante 2026 fueron entre 71.0 y 78.7% menores respecto a las observadas en 2025. Aunque en ambos ciclos se presentó un incremento de adultos hacia junio, la magnitud de este aumento fue menor durante 2026.

En conjunto, los resultados indican que el ciclo en el que el control químico inició antes de la floración se asoció con una menor captura de adultos de *A. eugenii* durante los primeros meses de monitoreo.

La principal diferencia observada entre los ciclos agrícolas evaluados estuvo relacionada con el momento en que iniciaron las aplicaciones de insecticidas. Aunque en ambos ciclos la captura de adultos aumentó conforme avanzó el desarrollo del cultivo, este incremento fue considerablemente menor durante 2026, cuando las aplicaciones comenzaron antes de la floración. Este comportamiento sugiere que el momento de inicio del control químico se asoció con las diferencias observadas en las capturas de adultos de *A. eugenii*.

La explicación de este comportamiento puede entenderse a partir de la biología del picudo del chile. Los adultos pueden colonizar el cultivo desde etapas tempranas y alimentarse de hojas, brotes tiernos, tallos y otros tejidos vegetativos; sin embargo, la oviposición ocurre principalmente en botones florales y frutos jóvenes, donde posteriormente se desarrollan los estados inmaduros protegidos dentro del tejido vegetal (Capinera, 2025; Fernández *et al*., 2020). Esto significa que la llegada de adultos al cultivo no implica necesariamente el establecimiento inmediato de nuevas generaciones. Mientras la disponibilidad de botones florales es limitada, también lo es la posibilidad de oviposición. Bajo este contexto, iniciar las aplicaciones antes de la floración puede representar una estrategia para reducir la población adulta antes de que el cultivo ofrezca las condiciones más favorables para la reproducción del insecto.

Esta interpretación coincide con lo reportado previamente por Espinoza *et al*. (2022), quienes documentaron que la presencia de *A. eugenii* inicia durante la floración y que la población aumenta conforme el cultivo avanza hacia las etapas de floración y fructificación. En ambos ciclos evaluados en el presente estudio se observó el mismo comportamiento general de incremento poblacional; sin embargo, las capturas fueron consistentemente menores cuando las aplicaciones iniciaron antes de la floración. En conjunto, estos resultados sugieren que el momento del inicio del control puede modificar la fluctuación inicial de la población adulta sin alterar el patrón natural de incremento asociado con el desarrollo fenológico del cultivo.

La relación entre la fenología del cultivo y la biología del insecto también ha sido documentada en otros estudios. Adeleye *et al*. (2024) observaron que las primeras infestaciones presentan una distribución agregada y que, conforme aumenta la disponibilidad de flores y frutos la población tiende a distribuirse de manera más uniforme dentro del cultivo. Los mismos autores señalan que el control del picudo se dificulta una vez que ocurre

la oviposición, debido a que huevos, larvas y pupas permanecen protegidos dentro de las estructuras reproductivas de la planta. Estos antecedentes respaldan la importancia de dirigir las estrategias de control hacia los adultos antes de que la población complete nuevas generaciones dentro del cultivo.

El presente trabajo no tuvo como propósito evaluar la eficacia de un insecticida en particular, sino analizar la influencia del momento en que inicia el control químico sobre la fluctuación poblacional del picudo del chile. Tradicionalmente, la eficacia del control químico se ha relacionado con la selección del ingrediente activo, la dosis o la frecuencia de aplicación; sin embargo, los resultados obtenidos muestran que la oportunidad de intervención también puede influir en el comportamiento de la población. Desde esta perspectiva, iniciar las aplicaciones antes de la floración podría incorporarse como un criterio complementario dentro de los programas de manejo integrado de *A. eugenii*, especialmente en regiones donde se conoce que la población incrementa conforme avanza la etapa reproductiva del cultivo.

Los resultados obtenidos muestran un patrón consistente entre ambos ciclos agrícolas y aportan evidencia de campo sobre la importancia del momento en que inicia el control químico. Si bien será conveniente validar este comportamiento bajo diferentes condiciones de producción y con mayor número de sitios de evaluación, la información generada constituye una base sólida para continuar investigando el efecto de la oportunidad de intervención sobre la fluctuación poblacional de *A. eugenii* y su posible incorporación como criterio de decisión dentro del manejo integrado del picudo del chile.

Conclusión

La captura de adultos de *Anthonomus eugenii* fue menor durante el ciclo agrícola 2026, cuando el control químico comenzó antes de la floración, en comparación con el ciclo 2025, cuando las aplicaciones iniciaron con 20-30% de floración. Debido a que en ambos ciclos se utilizó el mismo programa insecticida, el momento de inicio del control químico fue la principal diferencia documentada entre ambos esquemas. Los resultados sugieren que el inicio temprano de las aplicaciones se asocia con menores capturas iniciales de adultos; sin embargo, este comportamiento deberá validarse mediante ensayos replicados en un mayor número de parcelas y ciclos agrícolas.

Literatura citada

Revistas

Adeleye, V. O., Seal, D. R., Martini, X., Meru, G., & Liburd, O. E. (2024). Characterization of the spatial distribution of the pepper weevil, *Anthonomus eugenii* Cano (Col.: Curculionidae), in pepper fields in South Florida. *Insects*, *15*(8), 579. https://doi.org/10.3390/insects15080579

Espinoza-Castillo, D. F., Aragón-García, A., Soliz-Martínez, J., Aragón-Sánchez, M., & Pérez-Torres, B. C. (2022). Poblaciones del picudo del chile *Anthonomus eugenii* en Puebla, México. *Southwestern Entomologist, 47*(3), 775–778. https://doi.org/10.3958/059.047.0328

Fernández, D. C., VanLaerhoven, S. L., McCreary, C., & Labbé, R. M. (2020). Overview of the pepper weevil (Coleoptera: Curculionidae) as a pest of greenhouse and field pepper crops. *Journal of Integrated Pest Management, 11*(1), 26. https://doi.org/10.1093/jipm/pmaa029

Riley, D. G., Schuster, D. J., & Barfield, C. S. (1992). Refined action threshold for pepper weevil adults (Coleoptera: Curculionidae) in bell peppers. *Journal of Economic Entomology*, *85*(5), 1919–1925. https://doi.org/10.1093/jee/85.5.1919

Referencia electrónica

Capinera, J. L. (2025). *Pepper weevil, Anthonomus eugenii Cano and Cuban pepper weevil, Faustinus cubae (Boheman) (Insecta: Coleoptera: Curculionidae).* University of Florida IFAS Extension. Disponible en: https://ask.ifas.ufl.edu/publication/IN555 [Fecha de consulta: 07 de julio de 2026].

Productores de sideróforos como S*treptomyces* biocontrol de patógenos de *F*ragaria *x ananassa*

Vidal-Melchor Josué[34], Cortés-Martínez R, Valdez-Alarcón J.J.[35], Domínguez-González K.G.*

Resumen

El cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa*) es una de las principales actividades agroeconómicas en el estado de Michoacán; sin embargo, su productividad es drásticamente afectada por patógenos vasculares y radiculares como *Neopestalotiopsis clavispora* y *Phytophthora cinnamomi*. Ante la problemática ambiental y fitosanitaria asociada al uso intensivo de fungicidas químicos, el biocontrol mediante actinobacterias rizosféricas representa una alternativa sustentable. Esta investigación se centró en aislar e identificar molecularmente cepas de *Streptomyces* productoras de sideróforos y en evaluar su capacidad antagónica in vitro frente a dichos fitopatógenos. Se recolectaron muestras de suelo rizosférico en unidades productoras de fresa en Zamora, Michoacán. Se obtuvieron 22 cepas de *Streptomyces*, identificadas mediante la amplificación del gen 16S rRNA. Se evaluó la producción de sideróforos mediante la prueba de Cromo Azurol S (CAS) y su antagonismo por metabolitos difusibles (sideróforos) y compuestos orgánicos volátiles (COVs). El 100% de las cepas presentó una respuesta positiva en la prueba CAS. En los ensayos antagónicos, el 27.3% inhibió a *N. clavispora* por sideróforos y el 13.6% por volátiles; mientras que el 13.6% inhibió a *P. cinnamomi* por sideróforos y el 36.4% por volátiles. La cepa *Streptomyces griseoaurantiacus* destacó por su alta inhibición dual frente a ambos patógenos. Se concluye que las cepas nativas de *Streptomyces* representan una alternativa promisoria y sustentable para el biocontrol en el cultivo de fresa.

Palabras clave: *Streptomyces*, metabolitos secundarios, patógenos de fresa, biocontrol, sideróforos.

Abstract

Strawberry cultivation (*Fragaria x ananassa*) is a major agricultural and economic activity in Michoacán, Mexico. However, productivity is severely affected by soil-borne pathogens

[34] Laboratorio de Ciencias Ambientales, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich., México
[35] Laboratorio de Epidemiología Molecular y Biotecnología, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Tarimbaro, Mich, Mexico; Correos; 2000425H@umich.mx, raul.cortes@umich.mx, jose.alarcon@umich.mx, karla.dominguez@umich.mx*

such as *Neopestalotiopsis clavispora* and *Phytophthora cinnamomi*. To address the environmental and health hazards associated with synthetic chemical fungicides, biological control using rhizospheric actinobacteria offers a sustainable solution. This study aimed to isolate, molecularly identify, and evaluate the antagonistic capacity of siderophore-producing *Streptomyces* strains against these phytopathogens. Soil samples were collected from strawberry rhizospheres in Zamora, Michoacán. A total of 22 *Streptomyces* strains were isolated and confirmed via 16S rRNA gene amplification. Siderophore production was determined using the Chrome Azurol S (CAS) assay, and *in vitro* antagonism mediated by diffusible siderophores and volatile organic compounds (VOCs) was assessed. All strains (100%) showed positive siderophore production in the CAS assay. In antagonism tests, 27.3% of the strains inhibited *N. clavispora* via siderophores and 13.6% via VOCs, whereas 13.6% inhibited *P. cinnamomi* via siderophores and 36.4% via VOCs. Notably, *Streptomyces griseoaurantiacus* exhibited substantial dual inhibition against both pathogens. It is concluded that native *Streptomyces* strains represent a viable and eco-friendly biocontrol alternative for strawberry crop protection.

Keywords: *Streptomyces*, secondary metabolites, strawberry pathogens, biocontrol, siderophores.

Introducción

La fresa (*Fragaria x ananassa*) es un cultivo de alta relevancia socioeconómica a nivel mundial debido a sus cualidades organolépticas, nutricionales y antioxidantes. En México, el estado de Michoacán lidera la producción nacional con más de 326,000 toneladas anuales, lo que representa más del 73% del volumen total producido en el país (SIAP, 2023). La concentración geográfica de la producción en municipios como Zamora, Tangancícuaro y Jacona convierte a esta agroindustria en un pilar fundamental para la economía regional.

A pesar de su éxito productivo, el cultivo enfrenta severas amenazas fitosanitarias causadas por complejos fúngicos y oomicetos habitualmente presentes en el suelo. Entre las patologías de mayor impacto destacan la pudrición de raíz y el marchitamiento de la corona, causadas por especies emergentes y agresivas de los géneros *Neopestalotiopsis* y *Phytophthora* (Rebollar-Alviter et al., 2020; Ceja-Torres et al., 2008). Particularmente, *Neopestalotiopsis clavispora* genera necrosis foliar, tizón y colapso de coronas con pérdidas superiores al 70% en parcelas infectadas (Ángel et al., 2025). Por su parte, *Phytophthora cinnamomi* ocasiona la destrucción del sistema radicular y colapso vascular acelerado de la planta.

El control tradicional de estas enfermedades se ha basado predominantemente en el uso intensivo de desinfectantes químicos para el suelo (como Metam Sodio) y fungicidas sintéticos sistémicos (Metalaxil-M, Tiofanato metílico y Tebuconazol). No obstante, la

aplicación desmedida de estos insumos ha provocado resistencia ambiental en las poblaciones de patógenos, degradación de la calidad del suelo y riesgos considerables para la salud humana y los ecosistemas (Magallón et al., 2017). En este contexto, surge la apremiante necesidad de desarrollar alternativas biotecnológicas sustentables basadas en el manejo integrado de plagas y en el uso de microorganismos promotores del crecimiento vegetal (PGPR, por sus siglas en inglés).

Las actinobacterias del género *Streptomyces*, habitantes de la rizósfera, destacan por su sobresaliente capacidad para sintetizar una amplia diversidad de metabolitos secundarios bioactivos, incluidos antibióticos, enzimas hidrolíticas (quitinasas y glucanasas), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y sideróforos (Rey & Dumas, 2017). Los sideróforos son quelantes orgánicos de bajo peso molecular con alta afinidad por el hierro férrico (Fe^{3+}). Al ser secretados en el entorno rizosférico, complejizan el Fe^{3+}, tornando este micronutriente indisponible para los hongos fitopatógenos, inhibiendo así su desarrollo micelial y su capacidad infectiva por exclusión competitiva de hierro (Palaniyandi et al., 2013). La hipótesis central del presente estudio postula que las cepas nativas de *Streptomyces* aisladas de la rizósfera de *Fragaria x ananassa* producen sideróforos y metabolitos volátiles capaces de inhibir significativamente a *N. clavispora* y *P. cinnamomi*. El objetivo de este trabajo fue aislar, identificar molecularmente y evaluar la capacidad antagónica *in vitro* de actinobacterias nativas de la rizósfera de fresa.

Materiales y métodos

Muestreo. Se colectaron muestras compuestas de suelo rizosférico adherido a raíces secundarias de plantas sanas de *Fragaria x ananassa* en cuatro parcelas comerciales de la localidad de La Sauceda, municipio de Zamora, Michoacán (coordenadas 20°05'45.4" N, 102°21'35.9" O). El pH de cada muestra se midió en un potenciómetro (Thermo Scientific® Orion A329) en una suspensión suelo:agua desionizada (12 g : 30 mL) tras 1 h de reposo (Kloster et al., 2008).

Aislamiento, purificación y conservación. Para favorecer la selección de actinobacterias y eliminar bacterias no esporuladas, se aplicó un protocolo de descontaminación modificado de Hayakawa & Nonomura (1989). Dos gramos de suelo homogeneizado se suspendieron en agua estéril (1:10), sometiéndose a tratamientos combinados de Extracto de Levadura (YE), Dodecil Sulfato de Sodio (SDS al 3%) y choque térmico a 42 °C durante 25 min en baño maría. Alícuotas de 30 µL de las diluciones tratadas se sembraron en agar Infusión Cerebro Corazón (BHI) con asa de Drigalski e incubaron a 37 °C durante 72 h. Las colonias de morfología presuntiva de actinobacteria (duras, friables, serosas, adheridas al agar) se purificaron en tubos inclinados con BHI a 30 °C. La conservación a largo plazo se realizó en caldo BHI con glicerol al 10% a -20 °C.

Extracción de ADN e identificación molecular. La biomasa vegetativa se obtuvo en caldo Extracto de Malta en agitación a 30 °C por 3 días. El ADN genómico se extrajo mediante el método de lisis física con perlas de vidrio y extracción fenólica (McEwen-Ochoa et al., 2004). La integridad y concentración del ADN se determinaron por electroforesis en gel de agarosa al 0.8% (120 V, 25 min) con marcador de 1 kb plus e inspección en un fotodocumentador DNR Bio-Imaging Systems MiniBIS Pro, complementadas con lecturas espectrofotométricas en el NanoDrop 2000 (Thermo Scientific™). La región del gen 16S rRNA se amplificó por PCR utilizando los iniciadores universales 27F (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3') y 1492R (5'-TACGGYTACCTTGTTACGACTT-3') y la mezcla de Takara Bio® en un termociclador Veriti® (Applied Biosystems™) con el programa de termociclador de Domínguez-González et al, 2022. Los amplicones (~1500 pb) se secuenciaron en Macrogen Inc. (Seúl, Corea). Las secuencias ensambladas en UGENE v52.1 se alinearon mediante BLASTn (NCBI) y se asignó la especie a las coincidencias con ≥98% de identidad.

Evaluación cualitativa de sideróforos (Prueba CAS). La producción de sideróforos se cuantificó cualitativamente en agar Cromo Azurol S (CAS) modificado (Schwyn & Neilands, 1987). Las cepas se inocularon puntualmente e incubaron a 30 °C durante 72 h y, posteriormente, a temperatura ambiente durante 21 días. El viraje del medio de azul a un halo naranja/amarillo alrededor de la colonia confirmó la remoción de hierro del complejo Fe-CAS. *Pseudomonas aeruginosa* y una cepa no productora de *Streptomyces* sirvieron como controles positivo y negativo, respectivamente.

Ensayos de antagonismo in vitro. Se evaluaron dos cepas fitopatógenas de referencia: *Neopestalotiopsis clavispora* y *Phytophthora cinnamomi* 5-22. A) *Antagonismo por metabolitos difusibles (Sideróforos):* En placas con Agar Papa Dextrosa (PDA), se colocó una tira radial de la actinobacteria de 7 días de crecimiento y a los 3 días se inoculó un disco micelial de 5 mm del patógeno a 3 cm de distancia. B) *Inhibición por Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs):* Se utilizó la técnica del 'sándwich' de cajas Petri, selladas con Parafilm®, colocando la caja inferior con la cepa de actinobacteria en agar avena frente a la caja superior con el patógeno en PDA. El porcentaje de inhibición (PI) se calculó a los 7 días mediante la fórmula:

$$PI\ (\%) = [\ (DC - DE) / DC\ ] * 100 \qquad (1)$$

Donde DC representa el diámetro del crecimiento micelial en el control (cm) y DE el diámetro micelial en el tratamiento experimental (cm).

Análisis estadístico. Los datos de inhibición se analizaron mediante ANOVA de una vía y comparaciones múltiples de medias con las pruebas de Tukey-Kramer y Dunnett ($\alpha = 0.05$) en el software JMP® versión 11.

Resultados y discusión

Muestreo y aislamiento. Las cuatro muestras de suelo rizosférico de Zamora, Michoacán, presentaron valores de pH de ligeramente ácidos a neutros (entre 5.67 y 6.48). La muestra 4 (pH 6.48) presentó la mayor abundancia de aislamientos con características morfológicas típicas del género *Streptomyces*, debido a su cercanía a las condiciones óptimas de hábitat de estos microorganismos. De un total inicial de 37 colonias purificadas, se seleccionaron 22 cepas primarias que mantuvieron crecimiento micelial firme, producción de pigmentos solubles y esporulación vegetativa en agar avena.

Identificación molecular y prueba CAS. La amplificación y secuenciación del gen 16S rRNA confirmó que el 100% de las 22 cepas evaluadas pertenecen al género *Streptomyces* con identidades en BLAST ≥96% respecto a cepas de referencia (Tabla 1). Asimismo, la prueba cualitativa en medio CAS-Agar reveló que el 100% (22/22) de las cepas aisladas formaron halos de cambio de coloración de azul a naranja, lo que demuestra que las cepas de *Streptomyces* son productoras de sideróforos quelantes de hierro en condiciones de deficiencia de hierro.

Tabla 1. Identificación molecular basada en el gen 16S rRNA y respuesta al medio CAS de los aislados de Streptomyces

Clave de Cepa	Especie BLAST identificada	% Similitud	Respuesta CAS
1a	*Streptomyces glebosus*	100.00%	Positiva (+++)
2b1	*Streptomyces atrivirens*	99.14%	Positiva (++)
3a2	*Streptomyces libani* subps rufus	98.85%	Positiva (++)
4c	*Streptomyces spiralis*	97.97%	Positiva (+++)
1c1	*Streptomyces albiflavescens*	96.21%	Positiva (+)

2b3	*Streptomyces antibioticalis*	99.35%	Positiva (++)
4a7	*Streptomyces rubrogriseus*	99.14%	Positiva (++)

Fuente: Análisis bioinformático UGENE/BLAST y bioensayos de laboratorio.

**Halo pequeño (+), Halo mediano (++), Halo grande (+++)*

Actividad antagónica in vitro frente a hongos fitopatógenos**.** Los bioensayos de enfrentamiento dual evidenciaron diferencias marcadas en el mecanismo de acción antagónica según el patógeno evaluado, en la Tabla 2 se muestra como es la diferencia de antagonismo por parte de las cepas de Streptomyces, varia de un porcentaje alto de inhibición a uno bajo. Frente al hongo ascomiceto *Neopestalotiopsis clavispora*, 6 de las 22 cepas (27.3%) ejercieron una fuerte inhibición micelial mediada por sideróforos/metabolitos difusibles, con porcentajes de inhibición superiores al 65%, mientras que únicamente 3 cepas (13.6%) mostraron inhibición mediada por metabolitos volátiles.

Por el contrario, frente al oomiceto *Phytophthora cinnamomi* 5-22, la inhibición por compuestos orgánicos volátiles (COVs) fue el mecanismo predominante, registrándose una respuesta positiva en 8 de las 22 cepas (36.4%), con valores de inhibición de hasta 78.5%. En contraste, sólo 3 cepas (13.6%) inhibieron a *P. cinnamomi* mediante sideróforos difusibles. Cabe destacar a la cepa de *Streptomyces griseoaurantiacus* (aislado 1a), que exhibió una potente inhibición dual (>70% de PI) frente a ambos patógenos en ambos modos de acción.

Tabla 2. Comparación del porcentaje de inhibición (PI %) de *N. clavispora* y *P. cinnamomi* por volátiles vs sideróforos de *Streptomyces*

Cepa *Streptomyces*	*N. clavispora* (Volátiles %)	*N. clavispora* (Sideróforos %)	*P. cinnamomi* (Volátiles %)	*P. cinnamomi* (Sideróforos %)
S. griseoaurantiacus (RF8)	71.5 ± 0.2	53.5 ± 0.35	62.9 ± 0.2	68.9 ± 0.09

S. longwoodensis (1c3)	23.3 ± 0.12	51.2 ± 0.00	68.9 ± 0.03	53.4 ± 0.01
S. glebosus (1a)	34.3 ± 0.89	44.8 ± 0.09	38.6 ± 0.09	57.6 ± 0.12
S. spiralis (4c)	58.1 ± 0.87	54.1 ± 0.03	28.8 ± 0.40	37.9 ± 0.00
S. panaciradicis (4d4)	33.7 ± 0.06	42.4 ± 0.03	43.9 ± 0.17	17.4 ± 0.14
Control sin inóculo	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0

Fuente: Promedio de tres repeticiones ± desviación estándar. Prueba de Tukey-Kramer ($p < 0.05$).

El análisis microscópico óptico de las hifas en la zona de interacción reveló deformaciones estructurales severas causadas por las cepas antagónicas. En *N. clavispora*, la exposición a metabolitos difusibles provocó una vacuolización acentuada, lisis de la pared celular y colapso de las hifas. En el caso de *P. cinnamomi*, la presencia de compuestos volátiles indujo abultamientos hifales irregulares, fragmentación del citoplasma y detención del crecimiento apical de los zoosporangios.

La mayor susceptibilidad de *N. clavispora* a la privación de hierro mediada por sideróforos concuerda con lo reportado por Vargas-Hoyos y colaboradores (2025), quienes indican que los hongos ascomicetos dependen estrictamente de la asimilación de Fe^{3+} para la síntesis de citocromos y de enzimas del metabolismo respiratorio. Al ser quelado el Fe^{3+} por desferrioxaminas u otros sideróforos de *Streptomyces*, se frena drásticamente la germinación de conidios. Por su parte, la alta sensibilidad de *P. cinnamomi* a los metabolitos volátiles coincide con los hallazgos de Cuscó Casenave-Cambet y colaboradores (2025), sustentando que los COVs Lipofílicos penetran con facilidad la membrana celular de oomicetos alterando la permeabilidad osmótica.

Conclusiones

Se aislaron e identificaron molecularmente 22 cepas nativas del género *Streptomyces* procedentes de la rizósfera de cultivos de *Fragaria x ananassa* en Zamora, Michoacán.

El 100% de los aislados demostró capacidad cualitativa de producción de sideróforos en medio CAS-Agar, confirmando su potencial como quelantes de hierro en la rizósfera.

Los mecanismos de antagonismo variaron según el tipo de fitopatógeno: *Neopestalotiopsis clavispora* fue más susceptible a la inhibición por sideróforos/metabolitos difusibles (27.3% de cepas activas), mientras que *Phytophthora cinnamomi* presentó mayor sensibilidad a los compuestos orgánicos volátiles (36.4% de cepas activas).

La cepa *Streptomyces griseoaurantiacus* se consolidó como un biocontrolador prometedor debido a su elevada inhibición dual (>70%) frente a ambos fitopatógenos, constituyendo una alternativa ecológica clave para el manejo integrado de enfermedades vasculares en el cultivo de fresa.

Literatura citada

Ángel, C. A., Rebollar-Alviter, A., & Silva-Rojas, H. V. (2025). Etiology and integrated management of Neopestalotiopsis crown rot in strawberry crops. Phytopathology, 115(2), 180-192.

Ávila-Hernández, J. G., Rebollar-Alviter, A., & Silva-Rojas, H. V. (2025). Biology, epidemiology, and management of Neopestalotiopsis species causing strawberry disease. Horticulturae, 11(3), 288-305. https://doi.org/10.3390/horticulturae11030288

Ceja-Torres, L. F., Téliz-Ortiz, D., & Rodríguez-Alcázar, J. (2008). Etiología de la secadera de la fresa en Zamora, Michoacán, México. Agrociencia, 42(4), 441-450.

Cuscó Casenave-Cambet, A., Pérez-Vicente, L., & Martínez-Coca, B. (2025). Volatile organic compounds produced by Trichoderma spp. against Phytophthora palmivora. Journal of Applied Microbiology, 136(1), 45-58.

El-Tarabily, K. A., Sham, A., & Elbadawi, Y. E. (2021). Biofertilization and biocontrol of soil-borne fungal pathogens using Streptomyces species. Rhizosphere, 17, 100290.

Evangelista-Martínez, Z., Corona-Cruz, A., & Reyes-Vázquez, B. (2022). Antagonistic activity of Streptomyces strains against fungal pathogens of chili pepper. Revista Argentina de Microbiología, 54(3), 210-221.

Hayakawa, M., & Nonomura, H. (1989). A rapid method for the isolation of actinomycetes in soil by antibiotic treatment and thermal shock. Journal of Fermentation and Bioengineering, 67(4), 227-232.

Kloster, N., Crespo, C., & Silva, C. (2008). Métodos de análisis de suelos y plantas en laboratorios agrícolas. Ediciones INTA, 45-48.

Magallón, R., Rodríguez, A., & Vázquez, J. (2017). Manejo químico y biológico de enfermedades radiculares en el cultivo de fresa en México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 8(5), 1120-1135.

McEwen-Ochoa, R., Ruiz-Argüelles, A., & Fernández-Rojas, F. (2004). Protocolo simplificado para la extracción de ADN bacteriano de alta pureza. Bioquimia, 29(2), 58-64.

Morales, L., Domínguez, A., Sánchez, C., Alcántara, B., Cruz, H., & Echeverría, M. (2001). Lengua y Comunicación. México: Porrúa.

Olivares-Rodríguez, M., Silva-Rojas, H. V., & Rebollar-Alviter, A. (2024). In vitro evaluation of chemical and biological products for Neopestalotiopsis control in strawberry. Crop Protection, 175, 106420.

Palaniyandi, S. A., Yang, S. H., Zhang, L., & Suh, J. W. (2013). Effects of actinobacteria on plant disease suppression and growth promotion. Applied Microbiology and Biotechnology, 97(22), 9621-9636.

Rebollar-Alviter, A., Silva-Rojas, H. V., & Fuentes-Aragón, D. (2020). First report of Neopestalotiopsis crown rot in strawberry in Mexico. Plant Disease, 104(8), 2291.

Rey, T., & Dumas, B. (2017). Plenty is no plague: Streptomyces secondary metabolites as biocontrol agents and plant growth promoters. Trends in Plant Science, 22(3), 236-247. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.10.008

Schwyn, B., & Neilands, J. B. (1987). Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores. Analytical Biochemistry, 160(1), 47-56.

SIAP. (2023). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola: Cultivo de Fresa. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA, México.

Vargas-Hoyos, H. A., Gilchrist, E., & Ramírez, C. A. (2025). Siderophore production by Streptomyces species and its role in plant iron nutrition and biocontrol. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 41(2), 112-125.

Zhang, D. Z., & Peng, Z. R. (2014). Near-road fine particulate matter concentration estimation using artificial neural network approach. International Journal of Environmental Science and Technology, 11(8), 2403-2412. https://doi.org/10.1007/s13762-014-0565-4

Streptomyces spp. como modelo de biocontrol de *curvularia lunata*; una amenaza para los cultivos de México

Aline Michelle Meza-Salazar[36], David Guzmán-Hernández[37], Raúl Cortés-Martínez, Karla Gabriela Domínguez-González*

Resumen

El maíz y el trigo son cereales de gran importancia para México y constituyen, junto con otros cultivos, una base fundamental para la seguridad alimentaria. Sin embargo, la producción agrícola enfrenta desafíos, entre ellos la reducción de la superficie sembrada, los bajos incentivos económicos y la presencia de fitopatógenos como *Curvularia lunata*, asociados al empobrecimiento de los suelos y al uso excesivo de agroquímicos. Ante esta problemática, el objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de cepas del género *Streptomyces* como alternativa de biocontrol, mediante la actividad antagónica de los sideróforos y de compuestos volátiles frente a *C. lunata*. Se aislaron e identificaron molecularmente 22 cepas de *Streptomyces* spp. provenientes de la rizosfera de fresa (*Fragaria* × *ananassa*). La producción de sideróforos se evaluó mediante el método de CAS, mientras que la actividad antagónica se determinó mediante ensayos de confrontación directa y exposición a compuestos volátiles. El 100 % de las cepas presentó producción de sideróforos. En los ensayos de antagonismo, el 95,4 % mostró inhibición frente a compuestos volátiles y el 100 % presentó algún grado de inhibición asociada a sideróforos. Las cepas 1a2, 3b9 y 4a7 alcanzaron 91,8 % de inhibición por compuestos volátiles, mientras que la cepa 1c1 presentó 89,3 % de inhibición mediada por sideróforos. Además, se observaron alteraciones en estructuras reproductivas y en la morfología general del hongo. Estos resultados evidencian el potencial de *Streptomyces* spp. como agentes de biocontrol frente a *C. lunata*, ofreciendo una alternativa viable y ambientalmente amigable al uso de fungicidas.

Palabras clave: Fitopatógeno, pudrición de raíz, plaga foliar, sideróforos, volátiles, alternativa sustentable.

Abstract

Corn and wheat are cereals of great importance in Mexico and, together with other crops, constitute a fundamental basis for food security. However, agricultural production faces

[36] Facultad de Químico Farmacobiología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich., México
[37] Laboratorio de Ciencias Ambientales, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich., México

2000155k@umich.mx, 0849832g@umich.mx, raul.cortes@umich.mx, karla.dominguez@umich.mx

several challenges, including a reduction in cultivated area, low economic incentives, and the presence of phytopathogens such as *Curvularia lunata*, associated with soil degradation and the excessive use of agrochemicals. In response to this issue, the aim of this study was to evaluate the potential of strains of the genus *Streptomyces* as a biocontrol alternative through the antagonistic activity of siderophores and volatile compounds against *C. lunata*. Twenty-two *Streptomyces* spp. Strains were isolated and molecularly identified from the rhizosphere of strawberry (*Fragaria* × *ananassa*). Siderophore production was evaluated using the CAS assay, while antagonistic activity was determined through direct confrontation assays and exposure to volatile compounds. All strains (100%) showed siderophore production. In the antagonism assays, 95.4% of the strains showed inhibition by volatile compounds, while 100% exhibited some degree of inhibition associated with siderophores. Strains 1a2, 3b9, and 4a7 achieved 91.8% inhibition through volatile compounds, whereas strain 1c1 showed 89.3% inhibition mediated by siderophores. Additionally, alterations in reproductive structures and the overall morphology of the fungus were observed. These results demonstrate the potential of *Streptomyces* spp. as biocontrol agents against *C. lunata*, providing a viable and environmentally friendly alternative to the use of fungicides.

Keywords: Phytopathogen, root rot, foliar pest, siderophores, volatile, sustainable alternative.

Introducción

En México, los cereales como el maíz y el trigo constituyen la base de la seguridad alimentaria y económica del país. Específicamente en el estado de Michoacán, la producción agrícola de maíz constituye una actividad socioeconómica fundamental. No obstante, la superficie agrícola sembrada se ha visto comprometida por la degradación de los suelos, el uso desmedido de plaguicidas sintéticos y la incidencia constante de hongos fitopatógenos oportunistas.

Entre los agentes patógenos emergentes destaca *Curvularia lunata* (Wakker) Boedijn, un hongo ascomiceto capaz de provocar manchas foliares, necrosis y tizón en cereales, lo que reduce drásticamente el rendimiento fotosintético y de producción. Ante los impactos ambientales del control químico tradicional, surge la necesidad de implementar biocontroladores basados en organismos de la rizosfera.

Las actinobacterias del género Streptomyces son reconocidas por su capacidad de colonizar la rizosfera y de sintetizar metabolitos bioactivos. Destacan por la producción de sideróforos, moléculas quelantes de hierro que privan a los patógenos de este micronutriente esencial, y

de compuestos orgánicos volátiles (COVs) con actividad antifúngica a distancia. Este trabajo evalúa la capacidad antagónica de cepas de *Streptomyces* aisladas de la rizosfera de *Fragaria* × *ananassa* contra *C. lunata*.

Materiales y métodos

Aislamiento e identificación molecular: Se recolectaron muestras de suelo rizosférico de cultivos de fresa (*Fragaria* × *ananassa*). Se determinó el pH del suelo y se aplicó la metodología de descontaminación de muestras modificada de Hayakawa y Nonomura (1989). Las bacterias aisladas se conservaron y se sometieron a extracción de ADN genómico. La identificación taxonómica molecular del género *Streptomyces* se realizó mediante la amplificación por PCR del gen 16S rRNA (~1500 pb).

Detección de sideróforos (Ensayo CAS): La producción de sideróforos de las 22 cepas del género *Streptomyces* se evaluó cualitativamente mediante el ensayo en agar Cromo Azurol S (CAS), observando el viraje de color del azul al anaranjado/amarillo alrededor de las colonias.

Evaluación del antagonismo frente a *Curvularia lunata*: Se realizaron pruebas de inhibición del crecimiento micelial del hongo expuesto a compuestos volátiles en cámaras de doble caja Petri. Asimismo, se evaluó la inhibición mediada por sideróforos mediante pruebas de antagonismo en cultivo dual en placa. Se determinó el porcentaje de inhibición del crecimiento micelial y se aplicó un análisis estadístico de comparación de medias mediante la prueba de Tukey-Kramer ($p \leq 0.05$).

Resultados y discusión

A partir del suelo rizosférico de fresa se obtuvieron aislamientos microbianos, cuya descontaminación resultó exitosa. La electroforesis en gel de agarosa del ADN genómico y la posterior amplificación por PCR confirmaron la presencia del gen 16S rRNA, con un tamaño esperado de aproximadamente 1500 pb. Posteriormente, las 22 cepas fueron identificadas y confirmadas molecularmente como pertenecientes al género *Streptomyces* mediante la secuenciación del ADN y el análisis de similitud de las secuencias obtenidas con el programa BLAST (Tabla 1).

Tabla 1. Identificación taxonómica de cepas de Streptomyces mediante análisis molecular

AISLADO	ID NBCI-BLAST	AISLADO	ID NBCI-BLAST
1a	*S. glebosus*	3b5	*S. coelicoflavus*

1a1	*S. pactum*	3b9	*S. ardesiacus*
1a2	*S. olivaceus*	3x	*S. bungoensis*
1c1	*S. albiflavescens*	4a7	*S. rubrogriseus*
1c2	*S. longwoodensis*	4c	*S. spiralis*
1c3	*S. griseoaurantiacus*	4d4	*S. panaciradicis*
2b1	*S. atrovirens*	FR1	*S. resistomycificus*
2b3	*S. antibioticalis*	RF1	*S. spiralis*
2m	*S. lasalocidi*	RF2	*S. chartreusis*
3a2	*S. libani subsp rufus*	RF7	*S. griseoaurantiacus*
3b3	*S. ardesiacus*	RF8	*S. griseoaurantiacus*

En el ensayo CAS, el 100% de las 22 cepas analizadas dio un resultado positivo para la producción de sideróforos, demostrando un halo anaranjado característico producto del quelatamiento del Fe^{3+}.

En las pruebas antagonistas contra *Curvularia lunata*, los compuestos volátiles emitidos por las cepas de *Streptomyces* restringieron notablemente el diámetro de la colonia fúngica. Asimismo, el análisis estadístico mediante la prueba de Tukey-Kramer evidenció diferencias significativas en el porcentaje de inhibición del patógeno entre las distintas cepas destacando aislamientos clave con alta capacidad antagónica tanto por competencia de hierro como por emisión de COVs las cuales se señalan con un asterisco (*) en la Tabla 2.

Tabla 2. Porcentaje de inhibición de *Curvularia lunata* por cepas de *Streptomyces spp* mediante compuestos volátiles y sideróforos.

AISLADO	INHIBICIÓN POR VOLÁTILES (%)	INHIBICIÓN POR SIDERÓFOROS (%)
1a	38.5	45.5
1a1	54.9	41.8

1a2	**91.8 ***	31.1
1c1	27.9	**89.3 ***
1c2	34.4	6.1
1c3	32.8	29.5
2b1	0.0	19.7
2b3	55.7	7.4
2m	36.9	36.9
3a2	33.6	20.5
1a	45.9	0.8
1a2	**91.8 ***	18.0
1c1	31.1	32.8
1c2	**91.8 ***	11.5
1c3	43.4	49.2
2b1	28.7	53.3
2b3	9.8	26.2
2m	29.5	46.7
3a2	31.1	26.2
3b3	11.5	32.0

1a	62.3	6.6

Conclusión

- Se aislaron e identificaron molecularmente 22 cepas de *Streptomyces* spp. a partir de la rizosfera del cultivo de fresa (*Fragaria* × *ananassa*).
- El 100% de las cepas aisladas demostró la capacidad de sintetizar sideróforos mediante la prueba de Cromo Azurol S (CAS).
- Las cepas de *Streptomyces* spp. demostraron capacidad para inhibir el crecimiento micelial de *Curvularia lunata*, destacando *Streptomyces olivaceus* (1a2), *Streptomyces ardesiacus* (3b9) y *Streptomyces rubrogriseus* (4a7), que alcanzaron porcentajes de inhibición superiores al 90 % mediante la producción de compuestos volátiles, con valores de 91.8 %, mientras que *Streptomyces albiflavescens* (1c1) presentó el mayor porcentaje de inhibición mediante sideróforos, con 89.3 %. Estos resultados evidencian el potencial de *Streptomyces* spp. como una alternativa agroecológica viable frente al uso de plaguicidas sintéticos.
-

Literatura citada

Hayakawa, M., & Nonomura, H. (1989). A new method for the intensive isolation of actinomycetes from soil. *Actinomycetologica, 3*(2), 95–104.

Olanrewaju, O. S., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology, 33*, 197. https://doi.org/10.1007/s11274-017-2364-9

Olano, C., Lombó, F., Méndez, C., & Salas, J. A. (2008). Improving production of bioactive secondary metabolites in actinomycetes by metabolic engineering. *Metabolic Engineering, 10*(5), 281–292. https://doi.org/10.1016/j.ymben.2008.07.001

Sousa, J. A. de J., & Olivares, F. L. (2016). Plant growth promotion by streptomycetes: Ecophysiology, mechanisms and applications. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 3*, 24. https://doi.org/10.1186/s40538-016-0073-5

Suárez Meza, C. L., Fernández Barbosa, R. J., Valero, N. O., Gámez Carrillo, R. M., & Páez

Redondo, A. R. (2008). Antagonismo *in vitro* de *Trichoderma harzianum* Rifai sobre *Fusarium solani* (Mart.) Sacc., asociado a la marchitez en maracuyá. *Revista Colombiana de Biotecnología*, *10*(2), 35–43.

Wonglom, P., et al. (2019). [Referencia sobre actividad antagonista de *Streptomyces angustmyceticus* frente a *Curvularia lunata*].

Xie, Y., et al. (2020). [Referencia sobre actividad antifúngica de compuestos volátiles frente a *Curvularia lunata*].

Xing, Y., et al. (2024). [Referencia sobre compuestos volátiles producidos por *Streptomyces* y su actividad antifúngica].

TEMÁTICA 5. RECURSOS FITOGENÉTICOS Y DIVERSIDAD GENÉTICA

Calidad comercial y composicional de maíces nativos de Chiapas

María Gricelda Vázquez-Carrillo[38], Leticia García-Cruz*, Jesús Martínez-Sánchez

Resumen

Chiapas es uno de los estados con mayor diversidad de maíz. El objetivo de este estudio fue evaluar la calidad comercial y composicional de 30 colectas de maíces nativos provenientes del estado de Chiapas. Se llevó a cabo la identificación racial, así como la determinación del peso hectolítrico (PH), peso de cien granos (PCG), índice de flotación (IF), contenido de proteína y extracto etéreo, además del contenido fitoquímico. Las razas identificadas fueron Zapalote Grande, seguida de Zapalote Chico, Olotillo, Tepecintle, Comiteco y Elotes de Sinaloa. Los maíces se caracterizaron por tener PH superior a 74 kg hL-1, y se clasificaron como de endospermo muy duro, duro e intermedio (IF 2.5-52 %), con tamaños de grano de 28.87-41.93 g. Los maíces evaluados presentaron contenidos de proteína superiores a 9 % y alto contenido de aceite (3.98-6.3 %). Por su parte, el contenido de fenoles solubles totales estuvo en el intervalo de 93.84-253.7 mg equivalentes de ácido ferúlico por 100 g de materia seca, donde sobresalieron los maíces de grano pigmentado por antocianinas. Estos maíces representan un recurso valioso por su diversidad y aporte nutrimental, mismas que pueden aprovecharse en programas de mejoramiento participativo.

Palabras clave: aceite, dureza, fenoles solubles totales, proteína.

Abstract

Chiapas is one of the states with the greatest maize diversity. The objective of this study was to evaluate the commercial and compositional quality of 30 native maize accessions from Chiapas. The study involved race identification and the determination of test weight (TW), hundred-kernel weight (HKW), flotation index (FI), protein and ether extract content, and phytochemical content. The identified races were Zapalote Grande, followed by Zapalote Chico, Olotillo, Tepecintle, Comiteco, and Elotes de Sinaloa. The maize samples were characterized by a TW exceeding 74 kg hL^{-1} and were classified as having very hard, hard, or intermediate endosperm (FI 2.5–52%), with kernel weights ranging from 28.87 to 41.93 g. The evaluated maize samples exhibited protein content above 9% and high oil content (3.98–6.3%). Total soluble phenol content ranged from 93.84 to 253.7 mg of ferulic acid equivalents per 100 g of dry matter, with anthocyanin-pigmented varieties showing the

[38] Campo Experimental Valle de México-CIRCE-INIFAP. [2]Campo Experimental Centro de Chiapas CIRPAS-INIFAP. Correos electrónicos: letygc_1189@hotmail.com, vazquez.gricelda@inifap.gob.mx y martinez.jesus@inifap.gob.mx

highest levels. These maize varieties represent a valuable resource due to their diversity and nutritional value, and they can be utilized in participatory breeding programs.

Keywords: oil, hardness, phenols, protein

Introducción

México es centro de origen y diversificación del maíz, de las 64 razas identificadas en el territorio nacional, Coutiño-Estrada et al. (2015) informo la presencia de 18 razas en el estado de Chiapas, ubicando a este estado como uno de los de mayor diversidad de maíz. En Chiapas se siembran 515 mil hectáreas y constituyen el 75 % de la superficie ocupada con maíz en (SIAP, 2025).

La producción de maíces nativos está ampliamente arraigada por los agricultores de subsistencia, quienes mencionan que al cultivo de maíz nativo requieren menor inversión a diferencia de los maíces mejorados (Coutiño-Estrada et al., 2015). En este contexto, el estudio de la calidad de grano de los maíces nativos de Chiapas representa una herramienta estratégica para fortalecer la producción local, preservar la biodiversidad agrícola y promover el desarrollo de cadenas de valor basadas en recursos genéticos regionales (Urquiza et al., 2021).

Estudios recientes han trabajado con diversas razas nativas producidas en el estado de Chiapas. Salinas-Moreno y Hernández-Santiago (2025) evaluaron la calidad física y tecnológica de maíces nativos de la región trinitaria de Chiapas, en los que se calificó la dureza de los granos, el contenido de fenoles y la calidad de sus tortillas. Por su parte, Palacios-Pola et al. (2022) informaron sobre la diversidad de maíces nativos de Chiapas y su relación con sus usos tradicionales, especialmente en tortillas y tostadas. También estudiaron las características físicas de los granos de maíces nativos y su relación con las propiedades sensoriales de las tortillas (Palacios-Pola et al. (2021). De igual manera se han estudiado aspectos fitoquímicos de maíces nativos y mejorados de Chiapas (Peña-Betancourt et al., 2013; Salinas-Moreno et al., 2012). Resultados que muestran que son una fuente de diversidad genética, cultural y alimentaria, que es necesario seguir documentando, para articular la cadena de valor del maíz, que tiene la finalidad de favorecer su conservación, aprovechamiento sostenible y valorización en mercados especializados, contribuyendo al fortalecimiento de la producción local y la seguridad alimentaria. En este contexto el objetivo de esta investigación fue evaluar la calidad comercial y composicional de 30 colectas de maíces nativos provenientes del estado de Chiapas.

Materiales y métodos

Maíces estudiados

En el año 2025, en el estado de Chiapas se colectaron 30 poblaciones de maíces nativos, asociadas a diferentes razas, estas fueron producidas en ocho localidades de la región Valles Zoque de Chiapas, en los municipios de Ocozocoautla de Espinosa (Ocozocuatla, Ocuilapa de Juárez, La Naranja y San Isidro) y Cintalapa (Nuevo Tenochtitlan, Vista Hermosa, General Adolfo López Mateo y Abelardo Rodríguez) (Figura 1). La región Valles Zoque se localiza en la depresión central del estado, de clima cálido subhúmedo (Ramírez et al., 2018) y alturas sobre el nivel del mar, entre 573 y 1100 m.

La identificación racial de las colectas fue hecha por el Dr. Gilberto Esquivel Esquivel, del banco de germoplasma del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Las colectas se identificaron de la siguiente forma, se colocó el número de colecta seguido por las primeras letras del nombre de la raza. Las letras entre paréntesis corresponden al color visual de los granos, a para granos color amarillo, b para granos blanco, az para granos azules, y ® para granos rojos. Colectas con mezcla de color en grano se indican como (a+b), (b+a) o (az+b).

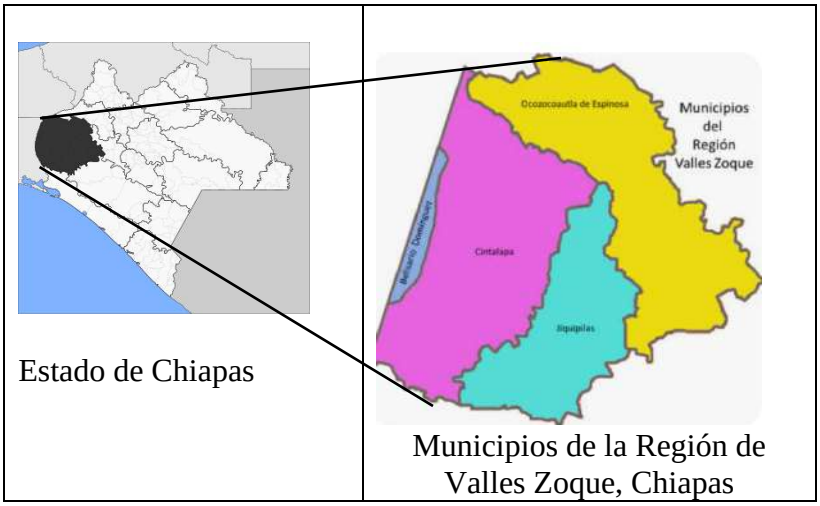


Figura 1. Ubicación geográfica de los municipios de Ocozocuautla de Espinosa y Cintalapa, Chiapas.

Características físicas

Los maíces se evaluaron en el Laboratorio de Calidad de Maíz del CEVAMEX-CIRCE-INIFAP. Todas las evaluaciones se realizaron en el grano entero e incluyeron: el peso hectolítrico (PH) y el índice de flotación (IF), este último es una medida indirecta de la dureza del grano, cuya clasificación es: maíces muy duros (IF: 0-12 % de granos flotantes), duros (IF:13-37); intermedios (IF:38-62), suaves (IF:63-87) y muy suaves (IF:88-100). En ambas variables se siguió la metodología descrita en la norma NMX-FF-034/1-SCFI-2020 (SE, 2022). El tamaño del grano se calificó con el peso de 100 granos (PCG) de acuerdo con la NMX-FF-034/2-SCFI-2003 (SE, 2003), donde se establece que, valores de PCG< 33 g corresponden a granos de tamaño pequeño, valores entre 33 y 38 g son para granos de tamaño medio y PCG>38 g son granos grandes. El color de los granos se determinó con un colorímetro Hunter Lab MiniScan XE Plus® (Reston, VA, USA). Se colocó una muestra de granos tomados al azar en una capsula protegida de la luz y se midió la luminosidad (L*), a, y b, con las dos últimas variables se clculó el hue y croma (datos no mostrados) (Sant'Anna et al., 2013).

Componentes químicos

La cuantificación de proteína y extracto etéreo se realizaron siguiendo los métodos 968.06 y 920.39 respectivamente, de la AOAC (2023). Los fenoles solubles totales (FST) se cuantificaron siguiendo el método Folin-Ciocalteu, de acuerdo con Singleton y Rossi (1965). Se empleó como estándar el ácido ferúlico y los resultados se informan como mg equivalentes de ácido ferúlico por cada 100 g de muestra seca (mg EAF 100 g-1 ms). En cuatro colectas de grano pigmentado se evaluó el contenido de antocianinas totales (AT) y se informan como mg equivalentes de cianidina para el caso de los maíces morados (mg ECy 100 g-1 ms), y pelargonidina para el caso de los maíces rojos (EPg 100 g-1 ms) (Salinas-Moreno et al., 2012).

Análisis de resultados

Los resultados se obtuvieron por triplicado y se analizaron mediante un diseño completamente al azar. Se llevaron a cabo análisis de varianza, prueba de comparación de medias con el estadístico Tukey ($p \leq 0.05$) y análisis de correlación de Pearson. Todos los análisis de llevaron a cabo en el programa estadístico SAS 9.0.

Resultados y discusión

Los maíces evaluados mostraron diferencia significativa ($p \leq 0.05$) entre colectas, en todas las variables analizadas, sustentando la diversidad genética en la región muestreada del estado de Chiapas. De la raza Zapalote Grande (ZG) se identificaron 13 colectas, esta raza fue la de mayor frecuencia. Al respecto, Ortega-Paczka (2003) informó que el número de agricultores que la sembraban había disminuido. Así la abundancia registrada en esta colecta podría deberse a que los agricultores han identificado características favorables. Adicionalmente se identificaron seis colectas de la raza Zapalote Chico (ZCh), cuatro de la raza Olotillo (OLO), tres de la raza Tepecintle (TEP), tres de la raza Comiteco (COM) y una de la raza Elotes de Sinaloa (ES) (Cuadro 1).

Los maíces analizados, fueron de grano muy duro, duro e intermedio (IF 2.5-52 %), con peso hectolítrico mayor a los 74 kg hL-1 establecidos por la NMX-034/1(SE, 2020) para maíces destinados al proceso de nixtamalización, a excepción de la colecta 13COM®, que presentó un PH de 68.6 kg hL-1. En cuanto al tamaño de grano, el 43.3 % de las colectas se clasificó como tamaño mediano, el 33.33 % como pequeño y el 23.3 % fueron de tamaño grande (Cuadro 1).

Las razas Zapalote Grande, Tepecintle y Olotillo, en su mayoría fueron de grano de tamaño mediano y grande (PCG= 36.4, 33.5 y 38 g respectivamente); de endospermo duro y muy duro (IF = 15, 15 y 28 %, respectivamente) (Cuadro 1). Estos valores difieren con lo informado por Salinas-Moreno et al. (2025) y Salinas-Moreno et al. (2012) para las mismas razas provenientes de otras regiones de Chiapas, quienes indican PCG promedios de 31.3, 42.9 y 38.2 g respectivamente. En el IF, los autores mencionados informaron valores promedio de: 38, 94 y 49 % respectivamente. Los cambios en el tamaño y la dureza en los maíces nativos estudiados, ha sido explicada, por la interacción entre el genotipo y las condiciones ambientales, especialmente durante el llenado del grano (Martínez-Sánchez, 2017). Otro factor es la selección que los agricultores realizan hacia granos con mayor densidad (menor IF), con lo que logran mayor rendimiento y menos perdidas por el ataque de plagas de almacén (López-López et al., 2023).

Cuadro 1. Características físicas y químicas de grano de maíces nativos de Chiapas clasificados por su dureza. PV-2025.

Identificación	Dureza de grano[2]	IF (%)	PH (kg hL^{-1})	PCG (g)	EE (%)[1]	Proteína (%)[1]
Cuadrados medios		432.2**	10.59 **	27.18 **	0.603 **	0.614 **

20ZG(a)	MD	2.5±0.71 m	80.7±0.42 ab	36.90±0.11 ef	6.30±0.03 a	10.45±0.07 abc
6ZG(b)	MD	3.5±3.5 lm	79.35±0.21 bcd	39.69±0.35 b	5.41±0.07 abcdef	10.17±0.02 abce
9TEP(a)	MD	6.0±1.4 klm	79.8±0.0 abc	32.51±0.37 j	4.73±0.21 cbdefghi	9.06±0.03 hij
5ZG(b+a)	MD	6.5±4.9 klm	78.55±0.71 cdfeg	37.0±0.04 e	4.62±0.31 cdefghi	9.34±0.12 fghij
11ZG(b)	MD	6.5±0.71 klm	78.5±0.0 cdefgh	36.27±0.007 f	4.69±0.11 bcdefghi	9.53±0.15 defghi
8ZG(a)	MD	7.0±1.4 klm	77.95±0.71 efghijk	31.28±0.035 k	4.74±0.41 bcdefghi	9.53±0.03 defghi
22ZG(a)	MD	7.0±2.8 klm	78.6±0.28 cdef	37.5±0.04 cde	5.06±0.37 bcdefghi	9.24±0.03 ghij
3ZG(b+a)	MD	7.0±2.8 lkm	76.25±0.21 lmnop	38.13±0.04 c	5.10±0.03 abcdefgh	9.70±0.18 defghi
10ZG(a)	MD	9.0±0.0 jklm	78.35±0.35 cdfghi	32.94±0.44 ij	4.44±0.52 efghi	10.63±0.01 ab
15ZG(b)	MD	11.5±2.1 ijklm	77.75±0.21 efghijk	40.19±0.03 b	4.52±0.13 defghi	10.84±0.13 a
17OLO(a)	D	14.5±3.5 hijkl	77.0±0.28 hijklmn	40.18±0.21 b	4.38±0.15 fghi	9.51±0.13 efghij
14ZCh(a+b)	D	15.0±1.4 ghijk	78.50.85 cdefgh	28.87±0.0 n	4.42±0.19 efghi	9.63±0.05 cdefghi
18ZCh(b)	D	18.5±3.5 fghij	81.05±0.50 a	30.44±0.01 l	4.98±0.22 bcdefghi	9.48±0.09 efghij
4OLO(b+a)	D	19.0±1.4 fghij	78.7±0.14 cde	41.93±0.38 a	4.81±0.05 bcdefghi	10.13±0.05 abcde
23ZCh(b)	D	22.0±4.2 efghi	77.05±0.71 ghijklmn	37.99±0.01 c	5.50±0.18 abcde	9.84±0.07 bcdefgh

29ZCh(b)	D	24.5±3.5 defgh	77.35±0.71 fghijklmn	31.05±0.02 kl	4.48±0.27 defghi	9.15±0.06 ghij
24ZG(b)	D	25.0±1.4 defgh	78.1±0.14 defghij	36.97±0.0 e	5.74±0.02 ab	9.78±0.34 cdefgh
21ES(az)	D	26.0±2.8 defg	77.10.14 fghijklmn	32.67±0.01 j	5.62±0.06 abc	10.42±0.23 abc
27ZCh(b)	D	28.5±0.7 def	74.9±0.14 pq	32.67±0.04 j	5.54±0.09 abcd	9.72±0.07 defghi
16ZG(b+a)	D	29.5±0.71 def	76.8±0.14	39.96±0.12 b	3.98±0.04 i	10.83±0.33 a
28TEP(b)	D	30.5±2.1 cde	77.15±0.92 fghijklmn	35.44±0.01 g	4.88±0.12 bcdefghi	10.19±0.42 abcde
2ZG(b+a)	D	33.5±4.9 bcd	76.1±0.28 mnop	29.40±0.30 nm	3.99±0.002 hi	9.32±0.47 fghij
25ZCh(b)	D	35.5±2.1 bcd	73.95±0.92 q	29.59±0.01 m	4.55±0.66 cdefghi	9.25±0.17 ghij
26COM(b)	D	35.5±3.5 bcd	76.45±0.63 klmno	37.73±0.04 c	4.71±0.05 bcdefghi	9.41±0.19 efghij
30OLO(a)	D	35.5±3.5 bcd	76.95±0.35 ijklmn	35.36±0.04 g	4.38±0.25 fghi	10.36±0.06 abcd
19ZG(b)	I	41.0±2.8 abc	78.45±0.21 cdefghi	37.26±0.03 de	4.98±0.13 bcdefghi	8.92±0.02 ij
1COM®	I	43±2.8 ab	75.05±0.21 opq	33.49±0.02 i	4.15±0.05 hi	9.93±0.48 bcdefg
12OLO(b+a)	I	43.0±0.0 ab	76.0±0.28 mnop	34.34±0.02 h	4.42±0.10 efgh	8.68±0.22 j
13COM®	I	49.0±0.0 a	68.6±0.28 r	40.23±0.035 b	4.29±0.28 ghi	9.76±0.09 cdefgh
7TEP(az+b)	I	52.0±2.8 a	75.7±0.0 nop	34.56±0.37 h	5.30±0.76 abcdefg	9.54±0.14 defghi
DHS		11.06	1.55	0.65	1.09	0.83

Color de grano

En las colectas evaluadas predominaron los granos de color blanco (60 %). Aunque en esta clasificación, seis colectas presentaron mezcla de granos color blanco (>50 %) y amarillo (<50 %). También se encontraron colectas de grano amarillo (26.67 %); dos colectas de grano morado, con pigmento en capa de aleurona (21TEP(az) y 7TEP(az+b), esta última colecta, con predominio de granos azul-morados (80%), pero también tuvo granos blancos (20 %). El experimento incluyó dos colectas de grano rojo, 13COM® y 1COM®, ambas con pigmento solo en pericarpio. La mayoría de los maíces presentaron color uniforme (Figura 1), lo cual se atribuye al cuidado que los agricultores tienen para aislar o sembrar en parcelas distantes los maíces de otros colores. Esta práctica ha permitido que el color de los granos se mantenga homogéneo.

En la variable luminosidad (L*), los maíces blancos registraron los mayores valores, los cuales estuvieron en el intervalo de 68.16 a 72.37 %. Destacaron las colectas 24ZG(b), 18ZCh(b), 27ZCh(b) y 19ZG(b) cuyos granos fueron los de mayor L* del grupo. En los maíces amarillos, los valores de L* estuvieron entre 55.86 y 67.47 %, destacaron por su color naranja intenso las colectas 17OLO(a), 20ZG(a), 9TEP(a). En los azules, la mayor L* (55.58 %) fue para la colecta 7TEP(az+b), lo cual se explica por su mezcla con granos blancos, en tanto que 21ES(az), fue menos luminoso (Figura 3). En colectas de la raza Comiteco, Salinas-Moreno et al. (2012) encontraron granos blancos con mayor luminosidad L* (73.8-75.8 %) mientras que los morados, con pigmento en capa de aleurona y pericarpio fueron menos luminosos (50.4 %) que los aquí estudiados. La diferencia de color en los maíces pigmentados (Figuras 2 y 3), ha sido explicada por la genética de la raza, las condiciones ambientales (Muñoz-Orozco, 2005), si el pigmento está contenido en pericarpio, en aleurona o en ambas estructuras, así como a la concentración de pigmento presente en estas estructuras (Salinas-Moreno y Hernández-Santiago, 2025). En estas colectas la luminosidad (L*) estuvo altamente correlacionada con hue ($r=0.9$, $p\leq0.001$). Diferente fue el comportamiento de la variable croma.

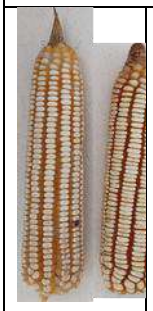
Cabe destacar que, seis de las colectas estudiadas (2ZG(bya), 4OLO(bya), 5ZG(bya), 12OLO(bya), 16ZG(bya) y 28TEP(b)) presentaron pigmentación por antocianinas en el totomoxtle, aun cuando el grano fue de color blanco y amarillo.

Composición química

Los maíces nativos estudiados, registraron buen contenido de aceite y proteína (promedio: 4.82 y 9.75 % respectivamente), sus valores estuvieron dentro de lo informado para maíces nativos y mejorados (Méndez-Montealvo et al., 2005). Destacaron 20 colectas, en las que sobresalen poblaciones con granos de color blanco y amarillo: Olo(bya), ZG(a) y ZCh(b),

que fueron estadísticamente diferentes y superiores al resto (Cuadro 2). Por lo anterior, estas poblaciones constituyen una fuente valiosa de germoplasma, para programas de mejoramiento y para mejorar la nutrición de los consumidores.

Los FST estuvieron entre 93.84 y 253.7 con un promedio de 131 mg EAF 100 g-1, superando a los informados para maíces nativos de Guanajuato (82.2-164 mg/100g) (Guzmán-Maldonado et al., 2015) e iguales o menores a los registrados en dos poblaciones del estado de Oaxaca (200-310 mg 100 g-1) (Peña-Betancourt et al., 2013). Diferencias que se atribuyen principalmente, a la raza, las condiciones climáticas y el manejo en la producción (Salinas-Moreno et al., 2012). Por su mayor contenido de FST, destacaron las colectas de grano pigmentado (Figura 3), en tanto que la de menor contenido de FST fue la colecta 16ZG(bya) con 93.4 mg EAF 100 g-1), y que se caracterizó por ser de grano grande y textura dura.

						
24ZG(b)	19ZG(b)	2ZG(b+a)	6ZG(b)	11ZG(b)	12OLO(b +a	28TEP(b)
						
4OLO(b +a	5ZG(b+a)	30OLO(a)	8ZG(a)	22ZG(a)	17OLO(a)	13COM®

				
18ZCh(b)	27ZCh(b)	25ZCh(b)	3ZG(b+a)	26COM(b)
				
29ZCh(b)	15ZG(b)	16ZG(b+a)	23ZCh(b)	14ZCh(a+b)
				
10ZG(a)	20ZG(a)	9TEP(a)	7TEP(az+b)	21ES(az)
				
1COM®				

Figura 2. Aspecto de mazorcas y granos de 30 colectas de maíces nativos del estado de Chiapas, del ciclo de producción primavera-verano 2025.

La colecta 21ES(az) de color azul obscuro-morado, registró el mayor contenido de FST (251.7 mg EAF 100 g-1) y de AT (27.87 mg ECy 100 g-1) (Figura 4), valores que fueron superiores a los informados por García et al. (2022) para una colecta denominada morado Sinaloa (240 mg EAF 100 g-1 y 3.5 mg ECy 100 g-1). La población 7TEP(az) presentó una mezcla de granos blancos (20 %), con azules y morados (80 %), donde los granos pigmentados tuvieron el pigmento en capa de aleurona. Esta colecta tuvo valores de FST y AT de 176.8 mg EAF 100 g-1 y 7.2 mg ECy 100 g-1 respectivamente, menores a los de

21ES(az) (Figura 3). De igual manera, registró menos AT a lo informado por Salinas-Moreno et al. (2012) para la misma raza (49 mg ECy 100 g-1). El bajo contenido de AT en ésta colecta puede deberse a los granos blancos presentes en la muestra (Figura 2), la cual fue tomada al azar.

Lao y Sigurdson, (2017) encontraron que los maíces de color morado intenso presentan generalmente niveles más altos de ácidos fenólicos, dentro de los cuales el ferúlico, p-cumárico y sinápico son los más importantes. En las dos poblaciones de la raza comiteco, ambas de granos rojos y con pigmento en pericarpio, registraron diferencias significativas ($P< 0.05$), en el contenido de FST y AT, respecto a los azules. El 1COM®, con mayor contenido de FST que 7TEP(az), no obstante, las AT estuvieron en menor cantidad (Figura 3). Por otro lado, la colecta 13COM®, registró el menor contenido de FST (113.9 mg EAF 100 g-1), además, no se detectaron AT, por lo que su color pudiera estar relacionado con flobafenos, pigmentos rojos insolubles en agua, con buena capacidad antioxidante y presentes en: pericarpio, glumas de la mazorca, la panícula, y las brácteas (Paulsmeyer et al., 2017). Por otra parte, se ha informado que la presencia de totomoxtle morado en cruzas de maíces nativos de Chiapas, es un rasgo variable. Aunque resalta que, a pesar de que las mazorcas presentan totomoxtle morado, el color de grano es blanco (Joya-Dávila, 2025).

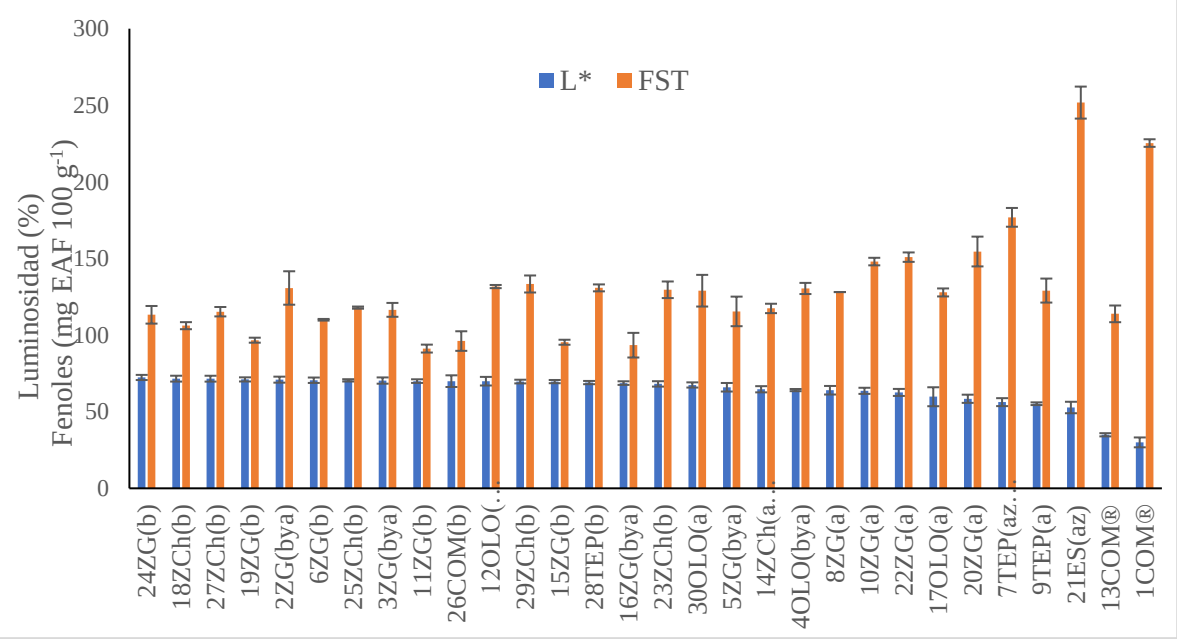


Figura 3. Luminosidad (L*) y fenoles solubles totales (FST, expresados en base seca) en maíces nativos del estado de Chiapas, del ciclo de producción primavera-verano 2025.

Se encontró que los maíces azules con pigmento en capa de aleurona, presentaron mayor contenido de AT, respecto a las colectas de la raza comiteco (13COM® y 1COM®), con pigmento en pericarpio (Figura 4), resultado que previamente fue observado por Salinas-Moreno et al. (2012) en maíces nativos de Chiapas.

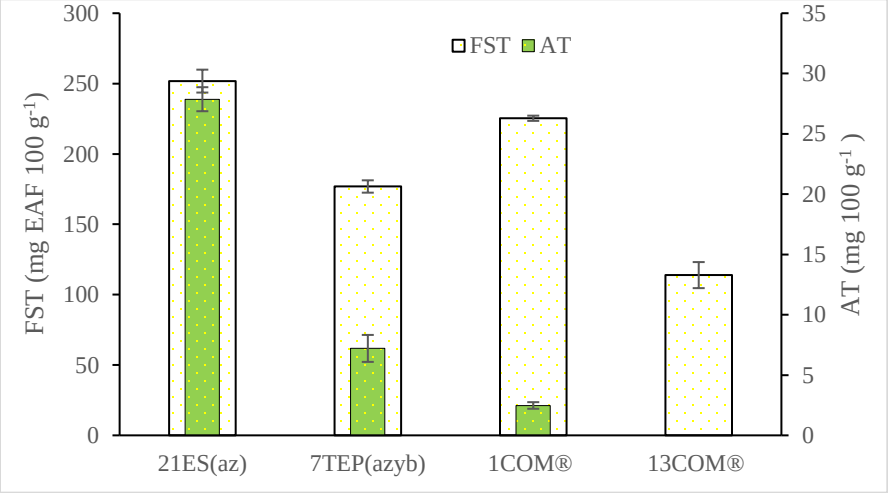


Figura 4. Fenoles solubles totales (FST) y antocianinas totales (AT) en maíces pigmentados del estado de Chiapas, México. Datos expresados en base seca. Colectas 21ES(az) y 7TEP(az) cuantificadas con curva de cianidina y colecta 1COM® cuantificada con curva de pelargonidina.

Conclusión

Los maíces nativos colectados en dos municipios de Chiapas, son de grano duro con peso hectolítrico superior al demandado en la norma NMX-034/1 y con alto contenido de proteína y extracto etéreo. Las poblaciones 21ES(az) y 7TEP(az+b) de granos azules y pigmento en aleurona presentaron mayor contenido de antocianinas totales, respecto a las colectas de grano rojo de la raza comiteco con pigmento en pericarpio. Independientemente del color de sus granos, los maíces nativos estudiados, resultan valiosos para la alimentación y por su diversidad, la cual puede aprovecharse en programas de mejoramiento participativo para promover la soberanía alimentaria.

Agradecimientos y fuente financiera

Los autores desean expresar su agradecimiento al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y a la SECHTI por el apoyo económico otorgado a través del proyecto denominado “Revalorización de maíces nativos y pigmentados a través de su contenido nutrimental y como fuente de moléculas bioactivas”. También agradecen al Dr. Gilberto Esquivel Esquivel, Investigador del Banco de Germoplasma del CEVAMEX-INIFAP, por su apoyo en la identificación de las razas de maíz.

Literatura citada

AOAC.2023. Association of Official Analytical Chemists, Official Methods of Analysis, 22 ed., 2005. Washington, D.C.

Coutiño-Estrada, B., Vidal-Martínez, V. A., Cruz-Vázquez, C., & Gómez-González, M. (2015). Características eloteras y de grano de variedades nativas de maíz de Chiapas. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 6(5): 1119-1127.

García-Reyes, E., Flores-Nevada, A., Ruis-Torres, N., Camposeco-Montejo, N., Ramírez-Barrón. S. N., & García-López, J. I. (2022) Compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de genotipos de maíz pigmentado (azul/morado). Temas de Ciencia y Tecnología 26(77); 13-19.

Guzmán-Maldonado, S.H., Vázquez-Carrillo2, M. G., Aguirre-Gómez, J. A., & Serrano-Fujarte, I. (2015). Contenido de ácidos grasos, compuestos fenólicos y calidad industrial de maíces nativos de Guanajuato. Rev. Fitotec. Mex. 38 (2): 213-222.

Joya-Dávila, J.G., Gutiérrez-Miceli, F.A., Serrano-Gómez, L.A., Salazar-Navarro, A., González-Mendoza, D., Tzintzun-Camacho, O., Santos-Espinoza, A.M., Sánchez-Grajalez, G., Gómez-Padilla, E., & Llaven-Martínez, J. (2025). Variability in anthocyanin expression in native maize: purple totomoxtle as a phenotypic trait of agroecological value. Plants 14: 2511. https://doi.org/10.3390/plants14162511

Lao, F. & Sigurdson, G. T. (2017). Health benefits of purple corn (Zea mays L.) phenolic compounds. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 16(2), 234–246. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12249

López-López H., de Santiago-Meza, J., Hernández-Alonso, E., Delgado-Ortiz, J. C., Castro-del Ángel, E., & Hernández-Juárez, A. (2023) Mecanismos de resistencia de poblaciones de maíz originarias de México al ataque del picudo Sitophilus zeamais. ITEA-Información Técnica Económica Agraria 119:196-210, https://doi.org/10.12706/itea.2023.003

Maldonado-Astudillo, Y. I., Gutiérrez González, A. A., Flores Rogel, Y. I., Arámbula-Villa, G., Flores-Casamayor, V., Jiménez-Hernández, J., Ramírez, M., Álvarez-Fitz, P., & Salazar, R. (2021) Propiedades morfométricas, fisicoquímicas y actividad antiproliferativa de maíces pigmentados de Guerrero. Nova Scientia, 27:13(3):1-26. https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2825

Martínez-Sánchez, J., Espenosa-Paz, N., & Cadena-Iñiguez, P. (2017). caracterización morfológica de poblaciones de maíz nativo (Zea mays L.) en Chiapas, México. Agroptoductividad, 10(9):26-33.

Méndez-Montealvo, G., Solorza-Feria, J., Velázquez-del Valle, M., Gómez-Montiel, N., Paredes-López, O., & Bello-Pérez, L. A. (2005). Composición química y caracterización calorimétrica de híbridos y variedades de maíz cultivadas en México. Agrociencia, 39:267-274.

Muñoz-Orozco, A. (2005) Centli-Maíz: Prehistoria e historia, diversidad, potencial, origen genético y geográfico, glosario Centli-Maíz. 2a edición. Colegio de Postgraduados.

Ortega-Paczka, R. (2003). Principales logros y problemas de los proyectos de conservación in situ y mejoramiento participativo de maíz en México. Delpinoa, 45:109-116.

Palacios-Pola, G., Perales, H., Estrada-Lugo, E.I.J., & Figueroa-Cárdenas, J. d. D. (2022) Nixtamal techniques for different maize races prepared as tortillas and tostadas by women of Chiapas, Mexico. J. Ethn. Food, 9(2):1-10. https://doi.org/10.1186/s42779-022-00116-9

Palacios-Pola, G., Perales-Rivera, H., Figueroa-Cárdenas, J. d. D., & Hernández-Estrada, Z. J. (2022). Changes in the physical, chemical, and sensory properties from three native corn landraces from Chiapas using two nixtamalization times. International Journal of Gastronomy and Food Science. 25:100373, https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100373.

Paulsmeyer, M., L. Chatham, T. Becker, Megan West, L. West, and J. Juvik (2017). A survey of anthocyanin composition and concentration in diverse maize germplasm. J. Agric. Food Chem.65(21):4341-4350. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b00771.

Peña-Betancourt, S.D., Carmona Medero, M. Á., & Valladares Carmona, B. (2013). Comparación de calidad física, contenido de fenoles y aflatoxinas en maíces híbridos y nativos. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 4 (5):779-788.

Ramírez, O., Espinosa, E., González, M. & Hernández, J. (2018). Situación económica del maíz en la región II Valles Zoque, Chiapas: Jiquipilas y Ocozocuatla. Revista Mexicana de Agronegocios, 43: 31-42

Salinas-Moreno, Y. & Hernández-Santiago, L. (2025) Características del grano y tortilla de maíces nativos de la región Trinitaria, Chiapas, México. Rev. Fitotec. Mex. 48(4): 455-461. https://doi.org/10.35196/rfm.2025.4.455

Salinas–Moreno Y., Salas-Sánchez, G., Rubio-Hernández, D., & Ramos-Lobato, N. (2005) Characterization of anthocyanins extracts from maize kernels. J. Chromatog. Sci. 43:483-487. https://doi.org/10.1093/chromsci/43.9.483

Salinas M., Y. & Vázquez C., G. 2006. Metodologías de análisis de la calidad nixtamalera-tortillera en maíz, INIFAP. Folleto Técnico. No. 23. INIFAP. Campo Experimental Valle de México. Chapingo, Edo. De México. México. 91 p.

Salinas-Moreno, Y., Cruz-Chávez, J., Díaz-Ortiz, S. A., & Castillo-González, F. (2012) Maíces pigmentados de Chiapas, características físicas, contenido de antocianinas y valor nutracéutico. Rev. Fitotec. Mex. 35 (1): 33-41.

Sant'Anna, V., Gurak, P. D., Ferreira Marczak, L. D., & Tessaro, I. C. (2013). Tracking bioactive compounds with colour changes in foods - A review. Dyes and Pigments, 98, 601–608. https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2013.04.011

SE, Secretaría de Economía (2022) NMX-034/parte1-SCFI-2020. Productos alimenticios para uso humano no industrializados-cereales-maíz-parte 1: granos para tortillas y productos nixtamalizados-especificaciones y métodos de prueba. Dirección General de Normas, Secretaría de Economía. Ciudad de México.

SE, Secretaría de Economía (2003) NMX-FF-034-SCFI-2020. Productos alimenticios para uso humano no industrializados-cereales-maíz (Zea mays L.) especificaciones y métodos de prueba. México. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Dirección General de Normas, Secretaría de Economía. Ciudad de México.

Sharma M., Chai C., Morohashi K., Grotewold E., Snook M. E., Chopra S. (2012). Expression of flavonoid 3-hydroxylase is controlled by P1, the regulator of 3-

deoxyflavonoid biosynthesis in maize. BMC Plant Biol. 12:196. https://doi.org/10.1186/1471-2229-12-196

SIAP. (2021). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Cierre de la producción agrícola: https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/. Consultado en junio de 2026.

Singleton, V.L.; Rossi, J.A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. Am. J. Enol. Vitic. 16, 144–158.

Urquiza, A., Amigo, C., Billi, M., Calvo, R., Gallardo, L., Neira, C. I. &, Rojas, M. (2021). An Integrated Framework to streamline resilience in the context of urban climate risk assessment. Earth's Future, 9(9): e2020EF001508. https://doi.org/10.1029/2020EF001508

Calidad, cantidad o compuestos bioactivos: estrategias reproductivas contrastantes en semillas de cuatro cactáceas mexicanas

José Valero-Galván[39], Yanelí Aurora Reyes-Ávila, Raquel González-Fernández, Miroslava Quiñonez-Martínez

Resumen

El objetivo del estudio fue caracterizar integralmente las semillas de *Echinocactus platyacanthus*, *E. horizonthalonius*, *Kroenleinia grusonii* y *Homalocephala parryi* mediante el análisis de su morfología, morfometría, germinación, composición fitoquímica y actividad antioxidante, con la finalidad de generar información útil para su conservación y aprovechamiento sustentable. La morfología se describió visualmente y los parámetros morfométricos se obtuvieron mediante mediciones de frutos y semillas. Se cuantificaron fenoles, azúcares, proteína y capacidad antioxidante. La germinación se evaluó después de la inmersión de las semillas en H_2O_2 al 30 % durante 0, 5, 10 y 15 min. *E. platyacanthus* produjo los frutos de mayor tamaño y presentó el porcentaje más alto de germinación (100 %). *E. horizonthalonius* mostró semillas de mayor tamaño y peso, así como las concentraciones más elevadas de compuestos fenólicos, proteínas y actividad antioxidante. *K. grusonii* produjo más de 1000 semillas por fruto, aunque registró los valores más bajos de germinación y contenido fitoquímico. *H. parryi* presentó valores intermedios para la mayoría de las variables, pero no mostró germinación. Las inmersiones cortas en H_2O_2 (≤ 5 min) favorecieron la germinación y el desarrollo de plántulas, mientras que tiempos mayores redujeron el vigor. Los resultados evidencian estrategias reproductivas contrastantes entre las especies estudiadas: *E. platyacanthus* invierte principalmente en la calidad de sus semillas, *K. grusonii* en la producción masiva y *E. horizonthalonius* en la acumulación de compuestos bioactivos. Estas diferencias influyen en su comportamiento germinativo y fisiológico y constituyen información relevante para programas de propagación *ex situ*, conservación y aprovechamiento sustentable.

[39] Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ciencias Biomédicas, Departamento de Ciencias Químico-Biológicas, Avenida Benjamín Franklin 4650, Zona pronaf, 32315, Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Correos electrónicos: jose.valero@uacj.mx; al187467@alumnos.uacj.mx; raquel.gonzalez@uacj.mx; mquinone@uacj.mx

Palabras clave: Cactaceae, semillas, germinación, fitoquímicos, actividad antioxidante, conservación.

Abstract

The aim of this study was to comprehensively characterize the seeds of *Echinocactus platyacanthus*, *E. horizonthalonius*, *Kroenleinia grusonii*, and *Homalocephala parryi* through the analysis of their morphology, morphometry, germination, phytochemical composition, and antioxidant activity, in order to generate information useful for their conservation and sustainable use. Morphology was described visually, and morphometric parameters were obtained through measurements of fruits and seeds. Phenolic compounds, sugars, proteins, and antioxidant capacity were quantified. Germination was evaluated after seed immersion in 30% H_2O_2 for 0, 5, 10, and 15 min. *E. platyacanthus* produced the largest fruits and exhibited the highest germination percentage (100%). *E. horizonthalonius* showed the largest and heaviest seeds, as well as the highest concentrations of phenolic compounds, proteins, and antioxidant activity. *K. grusonii* produced more than 1,000 seeds per fruit, although it showed the lowest germination rates and phytochemical content. *H. parryi* displayed intermediate values for most variables but showed no germination. Short H_2O_2 immersion times ($\leq$ 5 min) promoted germination and seedling development, whereas longer exposure times reduced seedling vigor. The results reveal contrasting reproductive strategies among the studied species: *E. platyacanthus* primarily invests in seed quality, *K. grusonii* in massive seed production, and *E. horizonthalonius* in the accumulation of bioactive compounds. These differences influence their germination and physiological performance and provide valuable information for *ex situ* propagation, conservation, and sustainable utilization programs.

Key words: Cactaceae, seeds, germination, phytochemicals, antioxidant activity, conservation.

Introducción

Las cactáceas son una familia de plantas nativas del continente americano que cuentan con alrededor de 130 géneros y 1850 especies (Schwertner-Charão et al., 2023). Actualmente, esta familia se encuentra entre las más vulnerables dentro de la flora mundial, debido principalmente a actividades antropogénicas (Hernández-Ledesma & Cruz-Esteban, 2021),

aunado a su endemismo y poblaciones reducidas (Schwertner-Charão et al., 2023), colocando a muchas en alguna categoría de riesgo, como es el caso de *Kroenleinia grusonii*, *Echinocactus platyacanthus* y *Homalocephala parryi*, especies endémicas de México que se encuentran dentro de la NOM-059-SEMARNAT-2010 con las categorías de peligro de extinción (P), sujeta a protección especial (Pr) y amenazada (A), respectivamente (SEMARNAT, 2010), lo que pone en riesgo su disponibilidad para futuras investigaciones. Cabe destacar que existe poca información publicada sobre las especies que pertenecen o han pertenecido al género *Echinocactus,* y menos acerca de sus compuestos bioactivos (Ramírez-Rodríguez et al., 2020), los cuales son producidos como protección contra el estrés causado por factores ambientales (Saadaoui et al., 2023). Estos ayudan a las semillas a mejorar su tasa de éxito en condiciones adversas, además, se ha demostrado que el consumo de fitoquímicos es beneficioso para la salud (Kumar et al., 2023), siendo útiles en áreas como medicina, cosmética y biotecnología, entre otras. En esta investigación se llevó a cabo un estudio exploratorio donde se analizaron las características morfológicas y morfométricas de las semillas de *Kroenleinia grusonii*, *Homalocephala parryi*, *Echinocactus platyacanthus* y *E. horizonthalonius*, así como su contenido fitoquímico y actividad antioxidante, con el fin de aportar información de utilidad para la toma de decisiones sobre su conservación, restauración de hábitats y fomento de su uso sostenible, además de contribuir al conocimiento actual que se tiene de estas especies, proporcionando una base para futuras investigaciones.

Materiales y métodos

Colecta de frutos

La recolección de las semillas se llevó a cabo entre los meses de agosto y noviembre de 2024. Las muestras correspondientes a *K. grusonii* (KGRU) y *E. platyacanthus* (EPLA) fueron obtenidas del Jardín Botánico de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA), ubicada en Bermejillo, Durango, en las coordenadas 25°53'37.5"N y 103°36'09.3"W. Por otro lado, las muestras de *E. horizonthalonius* (EHOR) fueron adquiridas en la Sierra Presidio, Ciudad Juárez, Chihuahua, en las coordenadas 31°22'46.9"N y 106°23'54.7"W. Finalmente, los frutos de *H. parryi* (HPAR) fueron colectados en la Sierra de Samalayuca, Ciudad Juárez, Chihuahua, en las coordenadas 31°18'05.3"N y 106°30'01.4"W. Este trabajo contó con el permiso de colecta de SEMANRNAT con registro 09/K5- 0431/12/23. La colecta de los frutos se llevó a cabo siguiendo el método propuesto

por González-Fernández et al. (2023) con algunas modificaciones. Para ello se seleccionaron 5 ejemplares al azar de cada especie en su sitio de colecta, de donde se obtuvieron un fruto por cada planta, cinco frutos por especie, los cuales fueron recolectados en su madurez, procurando que no presentaran daños por insectos o herbívoros, luego estos fueron colocados en bolsas herméticas de polietileno para ser identificados y etiquetados por especie.

Análisis morfológico y morfométrico del fruto y semillas

Para el análisis morfométrico de los frutos y semillas se realizó una adaptación del método de Reyes-Corral et al. (2022). Todos los frutos colectados fueron pesados individualmente en una balanza analítica (VelabTM, EE.UU.) para obtener su peso total. A continuación, se tomó una fotografía digital de los cinco frutos de cada especie con ayuda de una regla para conocer sus datos morfométricos como el área, perímetro, la longitud y el ancho mediante el software de procesamiento digital de imágenes ImageJ (Schneider et al., 2012).

Para evaluar la morfología de los frutos de cada especie, se seleccionaron tres frutos al azar y se observó el color, forma, presencia de escamas, areolas o espinas e hidratación de la pulpa, la cual se visualizó luego de que los frutos fueron cortados con ayuda de pinzas de disección y bisturí por la parte más blanda para no dañar la cáscara y extraer las semillas. Estas últimas fueron limpiadas de forma manual para proceder a tomar los pesos por separado de la cascara y total de semillas por fruto en una balanza analítica (VelabTM, EE.UU.) con el fin de conocer las proporciones de cascara y semilla con respecto al peso total del fruto.

Posteriormente, fueron tomadas de manera aleatoria 10 semillas de 5 frutos por población (n=50) a excepción de EHOR, puesto que no todos sus frutos contenían un mínimo de 10 semillas (n=45). Estas fueron colocadas en filas sobre una hoja cuadriculada para tomar fotografías de cada especie, las cuales se utilizaron para obtener sus medidas morfométricas como longitud, ancho, área y perímetro, al igual que con los frutos, utilizando el programa digital ImageJ (Schneider et al., 2012) según la metodología propuesta por González-Fernández et al. (2024).

Para evaluar la morfología de las semillas, se tomaron de manera aleatoria tres muestras de semillas pertenecientes a frutos diferentes de cada especie y fueron observadas en estereoscopio (VanGuard, China) con un aumento de 2.5X para definir las características de la testa, como la forma, el color y la textura.

Cuantificación de fitoquímicos de semillas

Para la determinación de la actividad fitoquímica y antioxidante, se realizó un extracto estándar de acuerdo al método propuesto por Reyes-Corral et al. (2022) y Álvarez-Parrilla et al. (2011). Esto se realizó dos veces para cada especie, de modo que al final se tuvieran un total de 8 extractos.

El contenido fenólico total fue obtenido por medio de espectrofotometría siguiendo el método utilizado por Georgé et al. (2005). La curva de calibración para determinar la concentración de las muestras se realizó utilizando ácido gálico como estándar, y los datos se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico (GAE) por g de semilla (mg GAE·g^{-1}).

Los flavonoides totales fueron obtenidos de acuerdo con el método propuesto por Georgé et al. (2005) por medio de espectrofotometría. La curva de calibración para este experimento se realizó utilizando catequina reactiva como estándar, y los datos se expresaron como mg equivalentes de catequina (CE) por g de semilla (mg CE·g^{-1}).

Los taninos totales presentes en los extractos fueron determinados por el método colorimétrico utilizando el ensayo de 4-(dimetilamino) cinamaldehído (DMAC) utilizando el método propuesto por González-Fernández et al. (2024). En esta prueba se utilizó Catequina reactiva como patrón para realizar la curva de calibración y los datos fueron presentados como mg equivalentes de catequina (CE) por g de semilla (mg CE·g^{-1}).

Para determinar la actividad antioxidante se realizaron por los métpdps del DPPH y FRAP siguiendo los métodos propuestos por Moreno-Escamilla et al., (2017). Para ambos métodos se utilizó TROLOX (Sigma-Aldrich®, México) como reactivo estándar para realizar la curva de calibración y los resultados se expresaron como mmol de equivalentes de TROLOX por g-1 de peso seco (mmol TE·g^{-1}).

Los azúcares reductores fueron obtenidos por medio del método DNS siguiendo el método propuesto por Ávila-Núñez et al. (2012). Para la curva de calibración se utilizó glucosa como estándar, expresando los resultados como mg de equivalentes de glucosa (GE) por g de peso seco de semilla (mg GE·g^{-1}). Para determinar los azúcares disueltos en las muestras, se utilizó un refractómetro de azúcar (Refractometer Sugar/Brix 0-32%) (Sper Scientific) empleando 25 µL de cada extracto en el prisma para obtener los grados Brix.

Para la extracción de proteínas se utilizaron 0.1 g de semillas siguiendo el método TCA/acetona-fenol descrito por Valero-Galván et al. (2014). El pellet final de proteínas se solubilizó en 50 µL de una solución buffer de urea 7 M (Jalmek- Scientific®, México) para luego eliminar el material insoluble por centrifugación. La absorbancia de las proteínas solubilizadas presentes en el sobrenadante se cuantificó utilizando un espectrofotómetro UV modelo Q3000 (Quawell, EE. UU.). Todas las extracciones se realizaron por duplicado para cada especie y fueron medidas como mg de proteínas por g de peso seco ($mg \cdot g^{-1}$).

Germinación de semillas

Este consistió de un lavado inicial con agua y jabón líquido (Axion®) durante 3 minutos, seguido de un enjuague con agua destilada. Posteriormente, se trataron con una solución al 10 % de hipoclorito de sodio (Cloralex® 4–6%) durante 3 minutos, se enjuagaron nuevamente y se expusieron a etanol al 70 % por 3 minutos. Finalmente, se realizó un último enjuague con agua destilada. Todo el proceso se llevó a cabo bajo agitación constante por inversión manual.

Para los tratamientos pregerminativos se utilizaron 84 semillas por especie. Las semillas desinfectadas se distribuyeron en cuatro tratamientos, con tres repeticiones cada uno. Se colocaron 7 semillas por repetición (28 por caja Petri). Los tratamientos consistieron en escarificación química mediante inmersión en peróxido de hidrógeno (H_2O_2) durante 5, 10 y 15 minutos, y un tratamiento control sin escarificación adicional (0 min). La germinación de las semillas se llevó a cabo siguiendo el método de González-Fernández et al. (2025) y Reyes-Corral et al. (2022), con algunas modificaciones.

Por especie, se utilizaron tres placas Petri esterilizadas, cada una con 25 g de suelo arenoso preesterilizado, 9 mL de agua destilada y 28 semillas distribuidas en cuatro divisiones, correspondientes a los tratamientos aplicados. Las placas se incubaron en una cámara bioclimática a 25 °C, con un fotoperíodo de 12 h luz/12 h oscuridad. La germinación se registró cada tres días durante 21 días, contabilizando las semillas germinadas.

Al finalizar el periodo experimental, se calcularon el porcentaje de germinación (PG), el tiempo promedio de germinación (TPG), la tasa media de germinación (TMG) el índice de velocidad de germinación (IVG) y la entropía de la distribución de frecuencias de la germinación de las semillas (E), según Souza et al. (2016). Además, de las plántulas

germinadas se tomaron como máximo cinco por población para medir la longitud, ancho y área del tallo, así como la longitud de la raíz, utilizando imágenes tomadas sobre papel milimétrico y analizadas con el software ImageJ (Schneider et al., 2012).

Análisis estadístico y de agrupamiento

Todas las pruebas estadísticas derivadas de la matriz de datos obtenida a partir de las mediciones de frutos, semillas y plántulas se realizaron con el software *IBM SPSS Statistics* (IBM Corp, 2013). Para el análisis estadístico se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk con el fin de comprobar la normalidad de los datos, posteriormente, por medio ANOVA de un factor y pruebas de comparaciones múltiples de Tukey (con un nivel de significancia del 95%) para determinar diferencias significativas entre los grupos, se analizaron los datos morfométricos de frutos, semillas y plántulas, así como los datos fitoquímicos y de germinación de las semillas.

Resultados y discusión

Análisis morfológico y morfométrico de frutos y semillas

Los frutos de las cuatro especies compartieron características generales, como un pericarpio delgado, escasa pulpa, coloración amarillenta al secarse y abundante lana con escamas espinosas oscuras emergiendo del exocarpio. No obstante, cada especie presentó rasgos distintivos que permitieron su diferenciación.

E. platyacanthus (EPLA) produjo frutos alargados, semi-piriformes, con exocarpo fino y coriáceo, cubierto por lana y pequeñas escamas. Estos frutos contienen numerosas semillas. *E. horizonthalonius* (EHOR) presentó frutos ovoides de tonalidades amarillentas a bronceadas, con menor cantidad de pulpa y rápida desecación. *H. parryi* (HPAR) mostró frutos pequeños y circulares, recubiertos por lana y escamas espinosas, que contienen una cantidad considerable de semillas a pesar de su reducido tamaño. Por su parte, *K. grusonii* (KGRU) presentó frutos redondeados, blanco-amarillentos y con una base aguda característica; al secarse muestran una línea marcada correspondiente a la base floral.

Las semillas también presentaron diferencias morfológicas evidentes entre especies. EHOR mostró semillas negras, esféricas a ovaladas, con superficie rugosa e hilio basal prominente, características consistentes con descripciones previas (Baker, 2022). HPAR presentó semillas

negras, globosas a semi-reniformes, con testa granulada o papilada y un hilio amplio. En contraste, KGRU exhibió semillas ovaladas, de textura lisa, color marrón rojizo y con un hilio basal pequeño. A nivel comparativo, EHOR y HPAR presentaron semillas de mayor tamaño y ornamentación superficial más compleja, mientras que EPLA y KGRU mostraron semillas más pequeñas y con menor grado de ornamentación.

Las variaciones observadas poseen valor taxonómico y podrían estar relacionadas con diferencias en los procesos de imbibición, germinación y dispersión. De acuerdo con Baskin y Baskin (2014), las semillas de cactáceas de ambientes áridos suelen presentar testas oscuras y resistentes que favorecen la protección del embrión y regulan la germinación bajo condiciones ambientales variables.

El análisis morfométrico de frutos y semillas reveló diferencias significativas entre las especies estudiadas. EPLA y HPAR compartieron valores similares en peso total del fruto, peso de la cáscara, peso total de semillas y número de semillas. Sin embargo, EPLA presentó los frutos de mayor tamaño, con una longitud promedio de 5.48 cm y un área de 9.38 cm². En contraste, EHOR y KGRU registraron los menores valores en dimensiones del fruto, con un área de 1.69 cm² y una longitud promedio de 1.32 cm, respectivamente.

En cuanto a las semillas, EPLA y HPAR mostraron pesos individuales similares (0.003 g), mientras que EHOR presentó las semillas más grandes y pesadas (0.008 g), a pesar de producir los frutos más ligeros (1.06 g) y el menor número de semillas por fruto (13.63). Por el contrario, KGRU produjo más de 1000 semillas por fruto, aunque con el peso individual más bajo (0.001 g).

Las diferencias morfológicas y morfométricas observadas entre las especies reflejan estrategias reproductivas contrastantes. Mientras que *E. platyacanthus* combinó frutos de gran tamaño con una elevada producción de semillas, *E. horizonthalonius* presentó pocas semillas, pero de mayor tamaño y peso, lo que sugiere una mayor inversión de recursos por individuo. En contraste, *K. grusonii* produjo una gran cantidad de semillas pequeñas, estrategia que podría incrementar las probabilidades de dispersión y establecimiento bajo condiciones ambientales variables, mientras que *H. parryi* mostró características intermedias. Asimismo, las diferencias en la ornamentación de la testa, el tamaño de las semillas y la forma del hilio sugieren adaptaciones relacionadas con la imbibición, la germinación y la dispersión, procesos que suelen estar estrechamente vinculados con la dinámica de

establecimiento en ambientes áridos (Baskin & Baskin, 2014). En conjunto, estos resultados evidencian distintos patrones de asignación de recursos reproductivos, donde las semillas de mayor tamaño pueden favorecer el vigor inicial de las plántulas, mientras que la producción masiva de semillas pequeñas constituye una estrategia alternativa para maximizar el éxito reproductivo bajo condiciones impredecibles (Bowers & Pierson, 2001; Sosa-Pivatto et al., 2014).

Actividad fitoquímica y antioxidante de las semillas

Las diferencias observadas en la composición fitoquímica y la actividad antioxidante sugieren estrategias fisiológicas contrastantes entre las especies estudiadas. *E. horizonthalonius* destacó por presentar las mayores concentraciones de compuestos fenólicos, flavonoides, azúcares reductores, proteínas y actividad antioxidante, lo que indica una alta capacidad para enfrentar el estrés oxidativo y un potencial valor nutracéutico. En contraste, *K. grusonii* mostró los valores más bajos para la mayoría de los metabolitos evaluados, mientras que *H. parryi* presentó valores intermedios y los mayores contenidos de taninos. La asociación observada entre el contenido fenólico y la actividad antioxidante coincide con lo reportado para otras cactáceas (Barkociová et al., 2021; Slimen et al., 2017). Los resultados resaltan el potencial de estas especies como fuente de compuestos bioactivos de interés para programas de conservación y aprovechamiento sustentable.

Germinación de las semillas

Los resultados de germinación evidenciaron respuestas diferenciadas entre las especies ante los tratamientos con H_2O_2. *E. platyacanthus* mantuvo altos porcentajes de germinación en todos los tratamientos, lo que sugiere una elevada viabilidad y ausencia de mecanismos importantes de dormancia. En contraste, *H. parryi* no presentó germinación, lo que coincide con reportes que atribuyen este comportamiento a barreras físicas y químicas asociadas a la testa, las cuales requieren tratamientos de escarificación más agresivos para ser superadas (García-González et al., 2020; García-González et al., 2022). Por su parte, *K. grusonii* mostró porcentajes de germinación moderados y una tendencia a disminuir su vigor bajo exposiciones prolongadas al H_2O_2, mientras que *E. horizonthalonius* presentó una germinación más rápida y uniforme con exposiciones cortas al oxidante. Estos resultados sugieren que el efecto del H_2O_2 depende de las características fisiológicas y estructurales de las semillas, pudiendo actuar como estimulador de la germinación cuando no existen barreras físicas significativas, tal como se ha reportado para otras especies vegetales (Barba-Espín et

al., 2012; Nazir et al., 2020). En conjunto, los resultados indican que las inmersiones cortas favorecen la germinación y el vigor de las plántulas, mientras que tiempos de exposición más prolongados pueden generar efectos negativos asociados al estrés oxidativo.

Morfología de la plántula

La morfometría de plántulas evidenció respuestas diferenciadas al tratamiento con H_2O_2 entre las especies estudiadas. En general, las exposiciones cortas no afectaron significativamente el crecimiento inicial, mientras que los tratamientos prolongados tendieron a reducir variables como longitud total, longitud de raíz y área de la plántula, particularmente en *E. platyacanthus*. Por su parte, *E. horizonthalonius* mostró una respuesta más estable y un mayor vigor inicial, caracterizado por plántulas más largas y robustas, lo que podría estar relacionado con sus mayores contenidos de proteínas y compuestos antioxidantes. En contraste, *K. grusonii* presentó el menor desarrollo general y una disminución de las variables morfométricas tras la exposición al H_2O_2. Estos resultados sugieren que la respuesta al oxidante depende de las características fisiológicas propias de cada especie y de su capacidad para tolerar el estrés oxidativo, ya que concentraciones moderadas de H_2O_2 pueden actuar como señales que favorecen procesos metabólicos asociados a la germinación, mientras que exposiciones prolongadas pueden provocar efectos inhibitorios sobre el crecimiento temprano de las plántulas (El-Maarouf-Bouteau & Bailly, 2008; Wojtyla et al., 2016). Asimismo, la estabilidad observada en *E. horizonthalonius* podría estar asociada a mecanismos antioxidantes más eficientes, en concordancia con su mayor contenido de compuestos bioactivos (Bewley et al., 2013).

Conclusión

Las especies estudiadas presentaron diferencias morfológicas, morfométricas, germinativas y fitoquímicas que evidencian estrategias reproductivas contrastantes. *E. platyacanthus* destacó por su elevada germinación y adecuada supervivencia de plántulas, mientras que *K. grusonii* mostró una estrategia basada en la producción masiva de semillas pequeñas. Por su parte, *E. horizonthalonius* presentó las semillas de mayor tamaño, contenido proteico y actividad antioxidante, lo que sugiere una mayor inversión en reservas y compuestos bioactivos. En contraste, *H. parryi* no germinó bajo las condiciones evaluadas, lo que indica la posible presencia de mecanismos de dormancia que requieren tratamientos específicos para

su ruptura. Estos resultados aportan información relevante para la propagación *ex situ*, conservación y aprovechamiento sustentable de estas cactáceas mexicanas.

Literatura citada

Álvarez-Parrilla, E., De La Rosa, L. A., Amarowicz, R., & Shahidi, F. (2011). Antioxidant activity of fresh and processed jalapeño and serrano peppers. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *59*(1), 163–173. https://doi.org/10.1021/JF103434U

Ávila-Núñez, R., Rivas-Pérez, B., Hernández-Motzezak, R., & Chirinos, M. (2012). Contenido de azúcares totales, reductores y no reductores en *Agave cocui* Trelease. *MULTICIENCIAS*, *12*(2), 129–135. https://www.redalyc.org/pdf/904/90424216002.pdf

Baker, M. A. (2022). A multivariate study of morphological characters for *Echinocactus horizonthalonius* and *E. texensis* (Cactaceae) and description of a new subspecies, *E. horizonthalonius subsp. australis*. *Diversity*, *14*(12), 1020. https://doi.org/10.3390/d14121020

Barba-Espín, G., Hernández, J. A., & Diaz-Vivancos, P. (2012). Role of H2O2 in pea seed germination. *Plant Signaling & Behavior*, *7*(2), 193–195. https://doi.org/10.4161/psb.18881

Barkociová, M., Tóth, J., Sutor, K., Drobnicka, N., Wybraniec, S., Dudík, B., Bilková, A., & Czigle, S. (2021). Betalains in edible fruits of three cactaceae taxa—*Epiphyllum*, *Hylocereus*, and *Opuntia*—their LC-MS/MS and FTIR identification and biological activities evaluation. *Plants*, *10*(12), 2669. https://doi.org/10.3390/plants10122669

Baskin, C. C., & Baskin, J. M. (2014). *Seeds: Ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination.* (2nd ed.). Academic Press.

Bewley, J. D., Bradford, K., Hilhorst, H., & Nonogaki, H. (2013). Seeds: Physiology of development, germination and dormancy. In *Springer Science & Business Media* (3rd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4693-4

Bowers, J. E., & Pierson, E. A. (2001). Implications of seed size for seedling survival in *Carnegiea gigantea* and *Ferocactus wislizeni* (Cactaceae). *The Southwestern Naturalist*, *46*(3), 272–281. https://doi.org/10.2307/3672423

El-Maarouf-Bouteau, H., & Bailly, C. (2008). Oxidative signaling in seed germination and dormancy. *Plant Signaling & Behavior*, *3*(3), 175–182. https://doi.org/10.4161/psb.3.3.5539

García-González, D. A., Osuna-Ávila, P., Santos-Díaz, M. S., & Flores-Margez, J. P. (2022). Initial seed weight and scarification affect in vitrogermination of *Echinocactus parryi* (Engelm.). *Agrociencia*, *56*(5), 1–9. https://doi.org/ 10.47163/agrociencia.v56i5.2484

García-González, D. A., Santos-Díaz, M. D. S., Flores-Margez, J. P., & Osuna- Ávila, P. (2020). Influencia del Ca2+, pH, agar y reguladores de crecimiento en la propagación in vitrode *Echinocactus parryi* (Engelm). *Terra Latinoamericana*, *38*, 489–498. https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.734

Georgé, S., Brat, P., Alter, P., & Amiot, M. J. (2005). Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant-derived products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *53*(5), 1370–1373. https://doi.org/10.1021/jf048396b

González-Fernández, R., Quiñones-Martínez, M., & Valero-Galván, J. (2023). Variaciones morfológicas en el fruto y semillas de cuatro estadios del fruto de *Cylindropuntia spinosior* (Cactaceae). *TECNOCIENCIA Chihuahua*, *17*(3), e1184. https://doi.org/10.54167/tch.v17i3.1184

González-Fernández, R., Quiñónes-Martínez, M., & Valero-Galván, J. (2024). Changes in the fruits and seeds morphometric, germination, phytochemicals content, and antioxidant capacity in seed ripening of *Echinocereus stramineus*. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, *26*, 131–150. https://doi.org/10.56890/jpacd.v26i.561

González-Fernández, R., Quiñónez-Martínez, M., Osuna-Avila, P., & Valero- Galván, J. (2025). Study on fruit and seed morphology and morphometry, seed phytochemicals, and germination characterization in three populations of *Echinocereus stramineus* (Cactaceae) at Ciudad Juárez municipality, Chihuahua, Mexico. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, *27*, 35–55. https://doi.org/10.56890/jpacd.v2

Kumar, A., Nirmal, P., Kumar, M., Jose, A., Tomer, V., Oz, E., Proestos, C., Zeng, M., Elobeid, T., Sneha, V., & Oz, F. (2023). Major phytochemicals: Recent advances in health benefits and extraction method. *Molecules*, *28*(2), 887. https://doi.org/10.3390/molecules28020887

Hernández-Ledesma, P., & Cruz-Esteban, S. (2021). Las pequeñas cactáceas: ¿camuflaje o simple coincidencia? *Elementos*, *124*, 71–76. https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000005979.pdf

Moreno-Escamilla, J. O., Alvarez-Parrilla, E., De La Rosa, L. A., Núñez-Gastélum, J. A., González-Aguilar, G. A., & Rodrigo-García, J. (2017). Effect of different elicitors and preharvest day application on the content of phytochemicals and antioxidant activity of butterhead lettuce (*Lactuca sativa* var. capitata) produced under hydroponic conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *65*(26), 5244–5254. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b01702/asset/images/medium/jf-2017- 017027_0004.gif

Nazir, F., Fariduddin, Q., & Khan, T. A. (2020). Hydrogen peroxide as a signalling molecule in plants and its crosstalk with other plant growth regulators under heavy metal stress. *Chemosphere*, *252*, 126486. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126486

Ramírez-Rodríguez, Y., Martínez-Huélamo, M., Pedraza-Chaverri, J., Ramírez, V., Martínez-Tagüeña, N., & Trujillo, J. (2020). Ethnobotanical, nutritional and medicinal properties of Mexican drylands Cactaceae fruits: Recent findings and research opportunities. *Food Chemistry*, *312*, 126073. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126073

Reyes-Corral, V. I., González-Fernández, R., Quiñónez-Martínez, M., Rodrigo- García, J., Iván-Garza, G., & Valero Galvan, J. (2022). Characterization of the morphometry, germination process, phytochemicals, and antioxidant capacity of seeds of three species of the genus *Cylindropuntia* (Cactacea) of Chihuahua state. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, *24*, 254–271. https://doi.org/10.56890/jpacd.v24i.506

Saadaoui, W., Tarchoun, N., Msetra, I., Pavli, O., Falleh, H., Ayed, C., Amami, R., Ksouri, R., & Petropoulos, S.A. (2023). Effects of drought stress induced by D-Mannitol on the germination and early seedling growth traits, physiological parameters and phytochemicals content of Tunisian squash (*Cucurbita maxima* Duch.) landraces. *Frontiers in Plant Science*, *14*. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1215394/bibtex

Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, *9*(7), 671–675.

Schwertner-Charão, L., Treviño-Carreón, J., & Delgado Martínez, R. (2023). Las fascinantes adaptaciones de las cactáceas y su historia evolutiva. *Ciencia Ergo Sum*, *30*(2). https://doi.org/10.30878/ces.v30n2a9

SEMARNAT. (2010). *NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres, categorización de riesgo de especies* [Norma Oficial Mexicana]. Diario Oficial de la Federación. https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-059- semarnat-2010

Slimen, I. B., Mabrouk, M., Hanène, C., Najar, T., & Abderrabba, M. (2017). LC- MS analysis of phenolic acids, flavonoids and betanin from spineless *Opuntia ficus-indica* fruits. *Cell Biology*, *5*(2), 17–28. https://doi.org/10.11648/j.cb.20170502.12

Sosa-Pivatto, M. S., Funes, G., Ferreras, A. E., & Gurvich, D. E. (2014). Seed mass, germination and seedling traits for some central Argentinian cacti. *Seed Science Research*, *24*(1), 71–77. https://doi.org/10.1017/s0960258513000366

Souza, L. F., Gasparetto, B. F., Lopes, R. R., & Barros, I. B. I. (2016). Temperature requirements for seed germination of *Pereskia aculeata* and *Pereskia grandifolia*. *Journal of Thermal Biology*, *57*, 6–10. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2016.01.009

Valero-Galván, J., González-Fernández, R., Valledor, L., Navarro-Cerrillo, R. Ma., & Jorrin-Novo, J.V. (2014). Proteotyping of holm oak (Quercus ilex subsp. ballota) provenances through proteomic analysis of acorn flour. *Methods in Molecular Biology*, *1072*, 709–723. https://doi.org/10.1007/978-1-62703-631- 3_49

Wojtyla, Ł., Lechowska, K., Kubala, S., & Garnczarska, M. (2016). Different modes of hydrogen peroxide action during seed germination. *Frontiers in Plant Science*, *7*(66), 1–16. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00066

Capacidad de fijar nitrógeno en cuatro variedades de maíz nativas de Puebla

Alejandro Celso Vallejo[40]; Víctor A; González Hernández[41]; Alejandro Alarcón[42]; Oscar J. Ayala Garay

Resumen

Se evaluó la actividad de la enzima nitrogenasa (Nasa) asociada con cuatro variedades de maíces nativos de la Sierra Norte de Puebla (SNP) y un híbrido comercial como testigo (HS-2), mediante el ensayo de reducción de acetileno (ARA) aplicado al mucílago de raíces adventicias. Las muestras de mucílago se incubaron en viales Falcon de 50 mL durante una hora en presencia de acetileno y el etileno (C_2H_4) generado se cuantificó mediante cromatografía de gases con un equipo PerkinElmer Clarus 400. La calibración se realizó con una mezcla estándar certificada de 100 µmol/mol de C_2H_4 en N_2. Se observaron diferencias significativas entre variedades en la actividad de nitrogenasa (ANOVA, F = 3.197; p = 0.0349). La prueba de Tukey HSD indicó que el maíz azul presentó la mayor actividad, con un promedio de 7.52 µmol/mol de C_2H_4, mientras que el híbrido HS-2 registró el valor más bajo, con 4.63 µmol/mol. Los maíces rojo, blanco y amarillo presentaron valores intermedios, sin diferencias estadísticas con los grupos extremos. Los resultados evidencian variabilidad entre los materiales evaluados respecto a la actividad nitrogenasa asociada con el mucílago de las raíces adventicias y aportan evidencia preliminar sobre el potencial de variedades nativas de la SNP para asociarse con microorganismos diazotróficos.

Palabras clave: fijación biológica de nitrógeno, maíz nativo, nitrogenasa, mucílago, Sierra Norte de Puebla.

[40] Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Producción de Semillas, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados
[41] Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados
[42] Posgrado en Edafología, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados

Abstract

Nitrogenase activity associated with four native maize varieties from the Sierra Norte de Puebla (SNP) and a commercial hybrid used as control (HS-2) was evaluated using the acetylene reduction assay (ARA) applied to adventitious-root mucilage. Mucilage samples were incubated in 50-mL Falcon vials for one hour in the presence of acetylene, and the ethylene (C_2H_4) produced was quantified by gas chromatography using a PerkinElmer Clarus 400 instrument. Calibration was performed with a certified standard mixture containing 100 µmol/mol C_2H_4 in N_2. Significant differences among varieties were detected for nitrogenase activity (ANOVA, $F = 3.197$; $p = 0.0349$). Tukey's HSD test showed that blue maize had the highest activity, averaging 7.52 µmol/mol C_2H_4, whereas the HS2 hybrid had the lowest value, 4.63 µmol/mol. Red, white, and yellow maize showed intermediate values, without statistical differences from the extreme groups. These results indicate variability among the evaluated materials in nitrogenase activity associated with adventitious-root mucilage and provide preliminary evidence of the potential of native maize varieties from the SNP to associate with diazotrophic microorganisms.

Keywords: biological nitrogen fixation, native maize, nitrogenase, mucilage, Sierra Norte de Puebla.

Introducción

El maíz (Zea mays L.) constituye uno de los cultivos agrícolas y alimentos de mayor importancia en México y forma parte del patrimonio biocultural del país. Los maíces nativos se han mantenido bajo una amplia diversidad de ambientes y prácticas de manejo, lo que ha favorecido la conservación de una importante diversidad genética y de características adaptativas particulares (Fernández Suárez *et al*., 2013; Kato et al., 2009).

El nitrógeno (N) es un nutrimento esencial para el crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos, por lo que su disponibilidad constituye un componente central de la productividad agrícola (Alcántar González y Trejo-Téllez, 2009). En este contexto, la fijación biológica de nitrógeno puede representar una alternativa de interés para disminuir parcialmente la dependencia de fertilizantes nitrogenados, particularmente cuando existen asociaciones funcionales entre plantas y microorganismos diazotróficos.

Un antecedente relevante es el maíz nativo Olotón de Oaxaca, cuyas raíces adventicias producen mucílago que favorece un microbiota diazotrófica capaz de realizar fijación biológica de nitrógeno. Se ha documentado que el mucílago proporciona compuestos de carbono que sostienen a los microorganismos asociados y que esta interacción puede

contribuir de manera importante a la nutrición nitrogenada de la planta (Van Deynze *et al*., 2018).

En la Sierra Norte de Puebla se ha observado la presencia de mucílago en raíces adventicias de poblaciones nativas de maíz. De acuerdo con el proyecto de investigación que sustenta este estudio, esta característica plantea la posibilidad de que dichos materiales presenten asociaciones con microorganismos diazotróficos y, por tanto, actividad nitrogenasa. La caracterización de esta capacidad es relevante para ampliar el conocimiento sobre la diversidad funcional de los maíces nativos y su posible aprovechamiento en sistemas agrícolas sostenibles.

Por ello, el objetivo de este trabajo fue evaluar la actividad de la enzima nitrogenasa asociada con el mucílago de raíces adventicias de cuatro variedades nativas de maíz de la Sierra Norte de Puebla, utilizando como referencia un híbrido comercial (H-S2), mediante el ensayo de reducción de acetileno.

La hipótesis de trabajo fue que las variedades nativas que producen mucílago en sus raíces adventicias presentarían actividad nitrogenasa detectable y que existiría variabilidad entre materiales en la magnitud de dicha actividad.

Materiales y métodos

El estudio se realizó con cuatro colectas de maíz nativo obtenidas en Amixtlán, Puebla, en la Sierra Norte de Puebla (20.0484° N, 97.7987° O), correspondientes a materiales de grano blanco, rojo, azul y amarillo. Como testigo se incluyó el híbrido comercial HS2. La semilla de los materiales nativos fue obtenida directamente de productores locales y se documentó mediante información de pasaporte y entrevistas sobre manejo agronómico.

La evaluación de campo se estableció el 17 de noviembre de 2025 en una parcela de la región. Se utilizó un diseño experimental en bloques al azar generalizado, con cuatro bloques y dos repeticiones por material dentro de cada bloque. Los surcos fueron de 10 m, con 0.80 m entre surcos y aproximadamente 1 m entre plantas; se colocaron cuatro semillas por golpe con el propósito de asegurar tres plantas por sitio. Las evaluaciones incluyeron la presencia de mucílago en raíces adventicias y variables morfoagronómicas.

Para la evaluación de actividad nitrogenasa se recolectaron muestras de mucílago de raíces adventicias de las cinco condiciones experimentales. El ensayo se realizó mediante reducción de acetileno (ARA), técnica en la que la actividad de nitrogenasa se estima a partir de la conversión de acetileno (C_2H_2) a etileno (C_2H_4). Las muestras se incubaron en viales Falcon de 50 mL durante una hora en presencia de acetileno. El C_2H_4 generado fue cuantificado por

cromatografía de gases utilizando un PerkinElmer Clarus 400. La calibración se efectuó con una mezcla estándar certificada de 100 µmol/mol de C_2H_4 en N_2.

La actividad se expresó con base en la señal de etileno obtenida por vial y tiempo de incubación. Para el análisis estadístico se utilizó R/RStudio. Se realizó un análisis de varianza para determinar diferencias entre materiales y, cuando correspondió, se efectuó una comparación de medias mediante la prueba de Tukey HSD con un nivel de significancia de 0.05.

Resultados y discusión

Se detectó actividad nitrogenasa asociada con el mucílago de raíces adventicias en los cinco materiales evaluados. El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre variedades ($F = 3.197$; $p = 0.0349$), lo que indica que la magnitud de la actividad asociada al mucílago no fue uniforme entre los materiales.

La prueba de comparación de medias de Tukey HSD identificó al maíz azul como el material con mayor actividad, con un promedio de 7.52 µmol/mol de C_2H_4, mientras que el híbrido HS-2 presentó el valor más bajo, con 4.63 µmol/mol. Los maíces rojo, blanco y amarillo presentaron valores intermedios y no mostraron diferencias estadísticas con los grupos extremos. En términos relativos, el valor promedio registrado en el maíz azul fue aproximadamente 62 % mayor que el observado en HS-2, lo que evidencia una diferencia funcional relevante entre ambos materiales.

La mayor actividad observada en el maíz azul es consistente con la hipótesis de que existe variabilidad entre genotipos en la interacción entre raíces adventicias, mucílago y microorganismos diazotróficos. El proyecto de investigación reporta que las poblaciones nativas de la SNP presentan mucílago en las raíces adventicias, una característica de interés debido a su semejanza con el sistema descrito para el maíz Olotón de Oaxaca (Van Deynze *et al*., 2018). Sin embargo, los resultados del presente ensayo deben interpretarse como evidencia de actividad nitrogenasa o potencial de fijación biológica, no como una cuantificación directa de la cantidad de N_2 incorporada a los tejidos de la planta.

El uso de un híbrido comercial como testigo permite establecer un punto de comparación dentro del experimento. El hecho de que HS-2 presentara la menor actividad, mientras que el maíz azul registró la mayor, sugiere que la condición observada no es únicamente una característica general del cultivo y que puede existir un componente asociado al material genético y/o al microbiota de la rizosfera. No obstante, para establecer el mecanismo de la asociación y confirmar la contribución de la fijación de N a la nutrición de la planta se

requieren evaluaciones complementarias de composición microbiana, abundancia de diazótrofos, balance de N y experimentos de trazadores.

En conjunto, los resultados amplían la evidencia disponible sobre la diversidad funcional de los maíces nativos mexicanos. Hasta el momento, el antecedente mejor documentado de fijación asociada a mucílago en maíz corresponde al material nativo de Oaxaca estudiado por Van Deynze *et al*. (2018); por ello, la actividad detectada en materiales de la SNP resulta relevante como punto de partida para confirmar y caracterizar nuevas asociaciones planta-microorganismo.

Cuadro 1. Actividad nitrogenasa asociada con el mucílago de raíces adventicias en los materiales evaluados

Material	Actividad promedio de C_2H_4 (µmol/mol)	Resultado de comparación
Maíz azul	7.52	Mayor actividad
Maíz rojo	Intermedio	Sin diferencia con grupos extremos
Maíz blanco	Intermedio	Sin diferencia con grupos extremos
Maíz amarillo	Intermedio	Sin diferencia con grupos extremos
HS-2 (testigo)	4.63	Menor actividad

Fuente: elaboración propia con base en los resultados experimentales.

Conclusiones

Las cuatro variedades nativas de maíz de la Sierra Norte de Puebla y el híbrido comercial HS-2 presentaron actividad nitrogenasa asociada con el mucílago de raíces adventicias bajo las condiciones evaluadas.

La actividad nitrogenasa difirió significativamente entre materiales. El maíz azul presentó la mayor actividad promedio (7.52 µmol/mol de C_2H_4), mientras que HS-2 presentó la menor (4.63 µmol/mol).

Los resultados respaldan la existencia de variabilidad entre materiales de maíz de la SNP respecto al potencial de asociación con microorganismos diazotróficos. El maíz azul constituye el material prioritario para estudios posteriores orientados a identificar y

caracterizar el microbiota asociado y determinar la contribución real de la fijación biológica de N a la nutrición de la planta.

Literatura citada

Alcántar González, G., & Trejo-Téllez, L. I. (2009). Nutrición de cultivos. Colegio de Postgraduados; Mundi-Prensa.

Arteaga, M. C., Moreno-Letelier, A., Mastretta-Yanes, A., Vázquez-Lobo, A., Breña-Ochoa, A., Moreno-Estrada, A., Eguiarte, L. E., & Piñero, D. (2016). Genomic variation in recently collected maize landraces from Mexico. Genomics Data, 7, 38–45. https://doi.org/10.1016/j.gdata.2015.11.002

CONABIO. (2020). Maíces. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Fernández Suárez, R., Morales Chávez, L. A., & Gálvez Mariscal, A. (2013). Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional: Una revisión indispensable. Revista Fitotecnia Mexicana, 36(Supl. 3-a), 275–283.

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. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1383373

Kato, T. A., Mapes, C., Mera, L. M., Serratos, J. A., & Bye, R. A. (2009). Origen y diversificación del maíz: Una revisión analítica. Universidad Nacional Autónoma de México; Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

McLaughlin, C. M., Li, M., Perryman, M., Heymans, A., Schneider, H., Lasky, J. R., & Sawers, R. J. H. (2024). Evidence that variation in root anatomy contributes to local adaptation in Mexican native maize. Evolutionary Applications, 17(3).

Pacheco Ávila, J., Pat Canul, R., & Cabrera Sansores, A. (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medioambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. Ingeniería, 6(3), 73–81.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural & Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. (2024). Guía de maíz nativo.

Uzcanga Pérez, N. G., Larqué Saavedra, B., Del Ángel Pérez, A. L., Rangel Fajardo, M. A., & Cano González, A. de J. (2017). Preferencias de los agricultores por semillas mejoradas y nativas de maíz en la Península de Yucatán, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 8(5), 1021–1033.

Van Deynze, A., Zamora, P., Delaux, P. M., Heitmann, C., Jayaraman, D., Rajasekar, S., Graham, D., Maeda, J., Gibson, D., Schwartz, K. D., Berry, A. M., Bhatnagar, S., Jospin,

G., Darling, A., Jeannotte, R., López, J., Weimer, B. C., Eisen, J. A., Shapiro, H. Y., … Bennett, A. B. (2018). Nitrogen fixation in a landrace of maize is supported by a mucilage-associated diazotrophic microbiota. PLoS Biology, 16(8), e2006352. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2006352

Composición proximal y respuesta germinativa de *Phytolacca icosandra* L., especie silvestre con valor nutricional potencial

Pablo Torres-Gutiérrez[43], José Antonio López-Sandoval, Aurelio Nieto-Trujillo, Santa Lucía Quintero-Bastida[44]

Resumen

Las plantas silvestres con potencial alimenticio representan una alternativa para diversificar la dieta humana y contribuir a solucionar unos de los problemas más importantes de la actualidad como son la escasez de alimentos y la pérdida de biodiversidad. El estudio evaluó la respuesta germinativa de *Phytolacca icosandra* L. (jaboncillo), una especie silvestre con potencial alimenticio, mediante distintos tratamientos pregerminativos. Las semillas presentaron características morfométricas homogéneas y una viabilidad de 72%, determinada con una prueba de tetrazolio, lo que indica un potencial germinativo aceptable. Sin embargo, la germinación fue significativamente menor, alcanzando 42% en el tratamiento de lijado de las semillas, el cual resultó el más efectivo. El análisis proximal mostró un contenido de proteína de 3.77 g 100 g^{-1} de peso fresco, superior al reportado para algunas hortalizas de hoja, además de un bajo contenido de carbohidratos (1.10 g 100 g^{-1}) y un reducido aporte energético (61.68 kcal 100 g^{-1}), características que respaldan su potencial como alimento alternativo. No obstante, debido a la presencia de saponinas característica del género *Phytolacca*, es indispensable complementar estos resultados con estudios de inocuidad y métodos de procesamiento que garanticen un consumo seguro. En conjunto, los resultados aportan información básica para la propagación y aprovechamiento de la especie.

Palabras clave: viabilidad, germinación, cultivos, saponinas

Abstract

Wild plants with edible potential offer an alternative for diversifying the human diet and helping to address some of today's most pressing problems, such as food scarcity and biodiversity loss. This study evaluated the germination response of *Phytolacca icosandra*

[43] Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México, el Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, 50200, México. pablot45@yahoo.com, jalopezs@uaemex.mx
[44] Posgrado en Botánica, Colegio de Posgraduados, Km 36.5 Carretera México-Texcoco, Montecillo, Estado de México, 56264 México. quinterolucia632@gmail.com

L. (jaboncillo), a wild species with edible potential, using various pre-germination treatments. The seeds exhibited homogeneous morphometric characteristics and a viability of 72%, as determined by a tetrazolium test, indicating acceptable germination potential. However, germination rates were significantly lower, reaching 42% in the seed sanding treatment, which proved to be the most effective. Proximate analysis revealed a protein content of 3.77 g per 100 g of fresh weight, higher than that reported for some leafy vegetables, as well as a low carbohydrate content (1.10 g per 100 g) and a low energy content (61.68 kcal per 100 g)—characteristics that support its potential as an alternative food source. However, due to the presence of saponins a characteristic of the genus *Phytolacca* it is essential to supplement these results with safety studies and processing methods that ensure safe consumption. Taken together, the results provide basic information for the propagation and utilization of the species.

Keywords: viability, germination, crops, saponins

Introducción

La seguridad alimentaria y la desnutrición representan uno desafíos para la humanidad en la actualidad. Entre los factores principales que provocan estos problemas de salud pública se encuentra el crecimiento de la población, el cambio climático, la degradación de los recursos naturales y la pérdida de biodiversidad (Kumar et al. 2025). Una de las posibles soluciones a esta problemática es la diversificación de los sistemas agrícolas mediante la incorporación de plantas silvestres con potencial alimenticio, que ya es reconocido por la población. Esta alternativa, constituye una estrategia prometedora para incrementar la producción de alimentos. (Bharucha & Pretty, 2010). En México se identifican entre 2,168 y 4,000 especies de plantas comestibles según los registros oficiales de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). En muchas de las especies antes mencionadas es necesario identificar protocolos de germinación efectiva, manejo del cultivo y análisis químicos de su valor nutricional (CONABIO, 2025).

Las plantas silvestres con potencial alimenticio son todas aquellas que no han pasado por un proceso formal de adaptación a los cultivos y se han aprovechado históricamente como fuente de alimento, representando una alternativa para complementar y diversificar la dieta humana (Borelli et al., 2020). Dentro de estas especies, se encuentra *Phytolacca icosandra* L., comúnmente llamada jaboncillo. Es una especie herbácea perenne, con raíz

pivotante y almacenadora, tallos ramificados, hojas simples e inflorescencias dispuestas en racimos axilares y terminales. Produce frutos que son bayas de color púrpura oscuro con numerosas semillas negras. Es una especie nativa de México y las Antillas, cuya distribución se extiende hacia diversos países de Centro y Sudamérica. Generalmente crece en ambientes alterados o perturbados, donde evidencia una elevada capacidad de establecimiento y adaptación (López-Sandoval et al. 2025). Desde el punto de vista etnobotánico, sus hojas tiernas son consumidas por algunas comunidades en forma de caldo, hervida (Balcázar-Quiñones et al., 2020) o guisada en caldillo de jitomate (Bye et al., 2024). Además, el jaboncillo posee importancia medicinal (para tratar afecciones de la piel, del cuero cabelludo y dolores reumáticos). Sus frutos maduros, debido a su contenido de saponinas, se utilizan como agente limpiador para el lavado de ropa y utensilios domésticos (Treyvaud et al. 2000).

El estudio de la germinación de las semillas y el análisis proximal son herramientas complementarias para evaluar el potencial de las plantas silvestres como nuevos recursos alimenticios. La caracterización de los requerimientos germinativos permite comprender los mecanismos que regulan el establecimiento de las especies, identificar tratamientos que favorezcan la ruptura de la latencia en la semilla y desarrollar estrategias para su propagación sexual o asexual y en etapas posteriores buscar su adaptación como un nuevo cultivo (Finch-Savage & Bassel, 2016). Por otro lado, el análisis proximal proporciona información sobre la composición nutricional de los órganos comestibles, al determinar el contenido de humedad, proteínas, lípidos, fibra, cenizas y carbohidratos, lo que permite valorar su calidad alimentaria y compararla con la de cultivos convencionales (Clemente-Villalba et al. 2023). En conjunto, la caracterización fisiobromatológica de las especies con interés potencial en la alimentación, generan información indispensable para seleccionar especies con potencial de aprovechamiento, promover su conservación y respaldar su incorporación a sistemas de producción sostenibles que contribuyan a la diversificación agrícola y al fortalecimiento de la seguridad alimentaria (Castro et al., 2026).

Una planta silvestre pueda aprovecharse en la agricultura, solo si se lograr que sus semillas germinen y se obtengan de ellas, numerosas plántulas; sin embargo, muchas especies han desarrollado mecanismos (latencia) que impiden que las semillas germinen de inmediato, lo hacen de forma escalonada, como una estrategia de supervivencia en condiciones no idóneas (Varsamis et al., 2025). Las semillas del jaboncillo poseen una cubierta externa (testa) dura e impermeable que dificulta la entrada de agua al embrión retrasando el proceso de germinación (Huber et al., 2024), esto representa un desafío

cuando se intenta germinar ya que dificulta la obtención de las plántulas para su establecimiento de adaptación como nuevo cultivo. Los tratamientos pregerminativos representan una herramienta fundamental para la propagación de especies silvestres, ya que permiten superar las barreras que limitan la germinación de las semillas mediante técnicas como la escarificación, la estratificación, la hidratación controlada y la aplicación de reguladores de crecimiento (Longjam & Kotiyal, 2024). Por ello, estudiar los procesos de germinación resulta fundamental para generar protocolos técnicos que permitan establecer programas de propagación eficientes. La información disponible sobre los aspectos germinativos del jaboncillo es escasa lo que dificulta su aprovechamiento. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar la composición proximal y respuesta germinativa de *Phytolacca icosandra* L., especie silvestre con valor nutricional potencial, para generar información que contribuya a su aprovechamiento para su establecimiento como un nuevo cultivo.

Materiales y métodos

Selección de semillas

Frutos maduros de *P. icosandra* fueron colectados de cuatro poblaciones creciendo como ruderales en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMéx), las semillas fueron extraídas manualmente y se seleccionaron aquellas que no presentaban ningún daño físico.

Caracterización morfométrica de la semilla

Las semillas fueron caracterizadas a nivel morfológico con la ayuda de un vernier electrónico, se midió el ancho (mm), largo (mm) y grosor (mm). El peso por semilla (g) se determinó con una balanza analítica con precisión de 0.0001 g. en el Laboratorio de Ecofisiología de la Facultad de Ciencias Agrícolas de UAEMéx.

Pruebas de viabilidad de la semilla

Se efectuó una prueba de viabilidad que consistió en remojar 50 semillas con 4 repeticiones en agua durante 6 horas para después realizar un corte (Figura 2, A y B) y someterlas en una solución de 2, 3, 5-trifenil-tetrazolio (tetrazolio) al 0.5% durante 12 horas en condiciones de obscuridad, las semillas que se pintaron de rojo fueron consideradas viables y las de color rosado o marrón fueron no viables (Maldonado-Peralta

et al., 2016).

Pruebas de germinación de la semilla

El estudio de la respuesta germinativa se estableció en un invernadero tipo túnel con cubierta de plástico, ubicado en la Facultad de Ciencias Agrícolas, en El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México (19° 17’ 29’’ N, 99° 39’ 38’’ O) a una altitud de 2640 m s. n. m. Durante el experimento, la temperatura media interna del invernadero fue de 22.3 °C, con un máximo de 32 °C y un mínimo de 13 °C, mientras que la humedad relativa promedio fue de 65%. Los datos de temperatura y humedad se midieron con un termohigrómetro (datalloger). Los tratamientos pregerminativos aplicados a las semillas fueron:

T1: remojo en agua a temperatura ambiente por tiempo de 24 horas
T2: remojo de las semillas en agua a temperatura de 60°C por 10 minutos
T3: lijado de las semillas con lija del número 80 durante 5 minutos
T4: inmersión en Ácido giberélico a 3 mg/L por 12 horas
T5: testigo

Las semillas fueron sembradas el día 10 de julio del 2025, se emplearon charolas de unicel de 200 cavidades y como sustrato se utilizó Peat moss en un 70% y Agrolita con un 30%. La prueba de germinación se realizó con 100 semillas considerando cuatro repeticiones. El porcentaje de germinación se contabilizó a los 21 días después de la siembra de acuerdo con lo establecido por el ISTA (2024). Con los resultados obtenidos se realizó un análisis de varianza y una prueba de medias de Tukey con significancias de $p<0.05$, el paquete estadístico utilizado fue InfoStat versión 2017.

Análisis proximal

Para el análisis proximal se colectó una muestra de 250 g de hojas de cuatro poblaciones, que crecen como ruderales en la Facultad de Ciencias Agrícolas de UAEMéx, alrededor de las 10 am el día 15 de febrero, se pesaron y transportaron en bolsas de papel destraza el mismo día al Laboratorio de Bromatología del Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria, Acuícola y Forestal del Estado de México (ICAMEX) para su procesamiento. La composición proximal se realizó de acuerdo con los protocolos establecidos por la AOAC (1990) donde los parámetros determinados fueron: humedad (%), proteína (g), grasas totales (g), fibra cruda (g), minerales (g), carbohidratos totales

(g), calorías (Kcal), azúcares totales (g) y sodio (mg).

Resultados y discusión

Caracterización morfométrica de la semilla

Los resultados mostraron que las semillas de *P. icossandra* tiene un ancho de 2.29±0.011 mm, un grosor de 1.51± 0.01 mm, un largo de 3.16±0.19 mm y un peso de 0.0042±0.0001 g por semilla (Figura 1, A y B). En un estudio donde se tuvo como objetivo identificar los caracteres morfométricos más influyentes para clasificar los tipos de semillas y sus estrategias de dispersión se encontró que los caracteres morfológicos de la semilla evaluados mediante morfometría en *P. icossandra* son muy parecidos a los de esta investigación. incluyen tanto parámetros cualitativos como cuantitativos (Lestari et al., 2024). Las características morfométricas de las semillas influyen directamente en la germinación y vigor de plántulas debido a que determinan la cantidad de reservas disponibles, por lo que es necesario cuantificas estas mediciones cuantitativas (Madrigal-González et al., 2026).

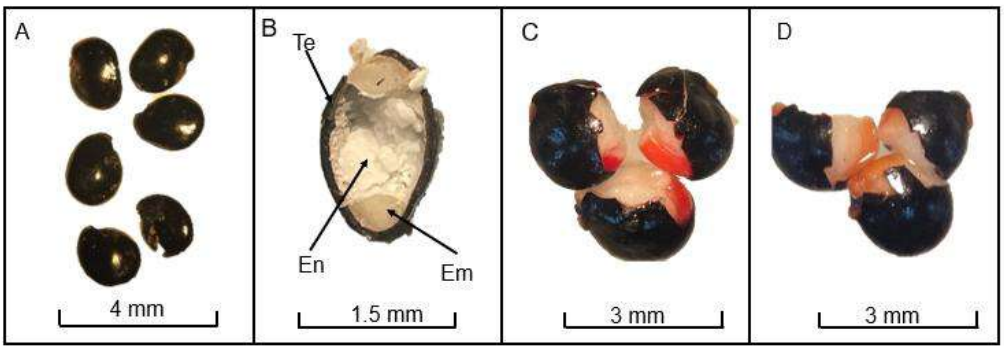


Figura 1. Semillas de *P. icosandra* L., A) vista general de las semillas, B) corte horizontal de una semilla, Te: Testa, En: Endospermo, Em: Embrión, C) semillas viables, D) semillas no viables.

Pruebas de viabilidad de la semilla

La prueba del tetrazolio demostró que las semillas poseen un 72±0.41% de viabilidad (Figura 1, C y D); lo que indica que tiene buena viabilidad, de acuerdo con el ISTA

(2024). El resultado de esta investigación coincide con lo reportado por Strgulc et al. (2023) para semillas fisiológicamente maduras de *Phytolacca americana* L. y *Phytolacca acinosa*, donde se evaluó la viabilidad de las semillas y se encontró que el porcentaje de viabilidad tuvo un rango de 55 a 90 % para ambas especies. La realización de pruebas de viabilidad permite conocer el potencial germinativo de semillas ya que la tinción de células vivas en el embrión indica que tienen potencial de germinar, el porcentaje obtenido se considera aceptable para especies que no han sido cultivadas (Monroy-Vázquez et al., 2017)

Pruebas de germinación de la semilla

El mayor porcentaje de germinación se obtuvo con el tratamiento de escarificación mecánica mediante lijado de las semillas (Tratamiento 3) (Figura 2). En un estudio donde se investigó en la germinación de las semillas de las mismas especies (*Phytolacca americana* y *Phytolacca acinosa*) en donde se recolectaron frutos en distintos estados de madurez de ambas especies (semillas frescas y secas, con y sin pericarpio) y se evaluó la germinación de las semillas y la maduración de los frutos. Las semillas germinaron independientemente del estado de madurez del fruto, aunque la germinación de las semillas secas fue mejor en comparación con la de las semillas frescas. Las semillas de *P. americana* tuvieron mayor número de semillas (51 semillas germinadas de 100) y la maduración de los frutos en plantas cortadas también fue más exitosa en comparación con *P. acinosa* (Strgulc et al., 2023).

Las semillas de *Psophocarpus tetragonolobus* presentan una baja germinación debido a la presencia de semillas duras impermeables al agua. Las semillas mostraron una germinación de solo el 31%, ya que el 69% restante poseía una cubierta seminal impermeable al agua. La abrasión con papel de lija y la inmersión en ácido sulfúrico durante 15 y 25 minutos eliminaron la impermeabilidad de las semillas, logrando una germinación superior al 89%. El lijado de la semilla favorece la ruptura de la testa, lo que acelera la activación metabólica y la emergencia de la radícula (Chang et al., 2022). Los hallazgos indican que las semillas de *P. icosssandra* presentan latencia física caracterizada por la presencia de una cubierta dura e impermeable dificultando la absorción de agua, con el lijado de la semilla se favorece su incrementa su germinación (Baskin & Baskin, 2004).

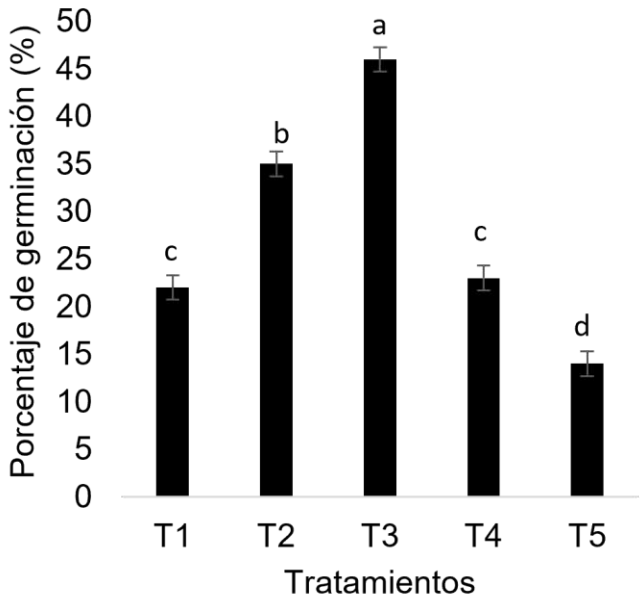


Figura 2. Prueba de medias: T1) remojo en agua a temperatura ambiente por tiempo de 24 horas, T2) remojo de las semillas en agua a temperatura de 60°C por 10 minutos, T3) lijado de las semillas con lija del número 80 durante 5 minutos, T4) inmersión en Ácido giberélico a 3 mg/L por 12 horas, T5) testigo.

Al comparar los resultados obtenidos en la prueba de tetrazolio y los obtenidos en la prueba de germinación se pueden observar diferencias considerables, se ha documentado que en especies del mismo género como *P. americana* existe un fenómeno denominado autotoxicidad que consiste en la presencia de toxinas derivadas de la misma planta afectando la germinación de sus semillas (Edwards et al., 1988), posiblemente esta sea la razón por la que no se alcanzaron porcentajes de germinación más elevados.

Análisis proximal

Los resultados del análisis proximal se indican en el Cuadro 1. El contenido de proteína presente en 100 g de materia fresca de *P. icosandra* (3.77 g). En una investigación donde se evaluó el valor nutricional de *Spinacia oleracea* L., con un contenido de humedad del

91 %, muestra un contenido de lípidos de entre el 0,4 % y el 0,6 % y un contenido de proteínas de alrededor del 2,9 %, con un aporte de niveles de aminoácidos esenciales, a excepción de los aminoácidos azufrados (metionina) (Murcia et al., 2020). La inclusión de plantas silvestres comestibles con contenido de proteína en la alimentación humana representa una estrategia relevante para diversificar la dieta y mejorar el aporte de nutrimentos esenciales, especialmente en poblaciones donde el acceso a fuentes convencionales de proteína puede ser limitado (Boyle et al., 2024).

El contenido de fibra cruda de *P. icosandra* (0.54 g 100 g de peso fresco). En un estudio que informa de la composición nutrimental de nueve colectas de tres especies de *Amaranthus* y una forma hibrida de *A. cruentus* x *A. hybridus* (análisis químico proximal). Los resultados promedio del análisis químico proximal (AQP) en g/100 g muestra que el contenido de fibra cruda 10.26. estos resultados son mayores a los encontrados en esta investigación e indican que los valores inferiores de *P. icossandra* (Dhingra et al., 2012; Mapes et al., 2024). El contenido de fibra resulta relevante debido a que favorece el adecuado funcionamiento del sistema digestivo, contribuye a la regulación de los niveles de glucosa y colesterol en sangre y puede reducir el riesgo de enfermedades crónicas no transmisibles (Bulsiewicz, 2023).

El contenido de carbohidratos de *P. icosandra* fue de 1.10 g por cada 100 g de peso fresco. En un estudio sobre la valorización de plantas silvestres comestibles como ingredientes alimentarios y su valor económico valor se encuentro que los valores de carbohidratos son cercanos a los de esta investigación: *Humulus lupulus* L. (1.6 g), *Anchusa azurea* Mill. (1.3 g), *Chondrilla juncea* L. (1.4 g), *Foeniculum vulgare* Mill. (1.4 g), *Montia fontana* subsp. *amporitana* Sennen (1.8 g); por otro lado, se encontraron valores muy altos de carbohidratos en *Berberis aristata* DC. (45.19 g) y *Origanum vulgare* L. (Clemente-Villalba et al. 2023). Los valores reportados se consideran bajos, lo que se traduce en un reducido aporte energético, como consecuencia, estas características hacen de *P. icosandra* un alimento potencialmente adecuado para dietas hipocalóricas, al aportar nutrientes con un bajo contenido de azúcares simples (Darmon et al. 2005)

Cuadro 1. Resultados del análisis proximal en hojas de *Phytolacca icosandra* L.

Parámetro	Unidad	Resultado

Humedad	%	90.25
Proteína	g	3.77
Grasas totales	g	4.93
Fibra cruda	g	0.54
Minerales	g	5.12
Carbohidratos totales	g	1.10
Calorías	Kcal	61.68
Azúcares totales	g	0.01
Sodio	mg	13.75

La composición proximal de *P. icosandra* respalda su potencial como recurso alimenticio alternativo, debido a su contenido de proteína y su bajo aporte de carbohidratos y energía (Ortiz-Trápala et al., 2026). En un estudio fitoquímico donde se evaluó los extractos metanólicos de las hojas y ramas de *Phytolacca icosandra* y *P. rugosa*, especies utilizadas tradicionalmente como repelentes contra las garrapatas del ganado vacuno (*Boophilus* ssp.), permitió el aislamiento de dos triterpenos penta-cíclicos y cinco saponinas triterpénicas. Sin embargo, su aprovechamiento debe evaluarse con cautela por la presencia de saponinas, compuestos que pueden presentar efectos antinutricionales o tóxicos si no se eliminan mediante un procesamiento adecuado (Galarraga et al., 2014).

Conclusiones

La integración de estudios de germinación y composición nutricional demuestra ser una estrategia eficaz para identificar especies silvestres con potencial de domesticación. En el caso de *P. icosandra*, los resultados obtenidos respaldan la continuidad de investigaciones sobre su manejo agronómico, mejoramiento de la propagación y evaluación integral de su calidad alimentaria, con el propósito de favorecer su incorporación como un recurso vegetal alternativo en sistemas agrícolas. Se considerar como con ciertas precauciones por la presencia de saponinas. Es indispensable complementar estos resultados con

estudios de inocuidad y métodos de procesamiento que garanticen un consumo seguro.

Literatura citada

Libros

AOAC, Association of Official Analytical Chemists (1990). *Official Methods of Analysis.*15 th edition. Association of Official Analytical Chemists. Arlington, VA, USA. 1285p

Artículos

Balcázar-Quiñones, A., White-Olascoaga, L., Chávez-Mejía, C. & Zepeda-Gómez, C. (2020). Los quelites: riqueza de especies y conocimiento tradicional en la comunidad otomí de San Pedro Arriba, Temoaya, Estado de México. *Polibotánica*, *48*: 219-242. https://doi.org/10.18387/polibotanica.49.14

Baskin, J. M., & Baskin, C. C. (2004). A classification system for seed dormancy. *Seed Science Research*, *14*(1): 1-16. https://doi.org/10.1079/ssr2003150

Bharucha, Z., & Pretty, J. (2010). The roles and values of wild foods in agricultural systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 365(1554): 2913–2926. https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0123

Borelli, T., Hunter, D., Powell, B., Ulian, T., Mattana, E., Termote, C., Pawera, L., Beltrame, D., Penafiel, D., Tan, A., Taylor, M. & Engels, J. (2020). Born to Eat Wild: An Integrated Conservation Approach to Secure Wild Food Plants for Food Security and Nutrition. *Plants*, *9*(10): 1299. https://doi.org/10.3390/plants9101299

Boyle, F., Lynch, G., Reynolds, C. M., Green, A., Parr, G., Howard, C., Knerr, I., & Rice, J. (2024). Determination of the Protein and Amino Acid Content of Fruit, Vegetables and Starchy Roots for Use in Inherited Metabolic Disorders. *Nutrients*, *16*(17): 2812. https://doi.org/10.3390/nu16172812

Bulsiewicz, W. J. (2023). The importance of dietary fiber for metabolic health. *American Journal of Lifestyle Medicine*, *17*(5): 639–648. https://doi.org/10.1177/15598276231167778

Bye, R., Linares, E., & Luna, M. (2024) Quelites de la cuenca de México y regiones adyacentes: su diversidad, distribución geográfica, procedencia, formas de consumo y preparaciones. *Revista etnobiología*, *22*(3): 150-174.

Clemente-Villalba, J., Burló, F., Hernández, F., & Carbonell-Barrachina, Á. A. (2023). Valorization of wild edible plants as food ingredients and their economic value. *Foods*, *12*(5): 1012. https://doi.org/10.3390/foods12051012

Chang, Y. S., & Tai, W. C. (2022). The Effect of Scarification Treatments and Seed Moisture Content on Hardseededness Breaking of Winged Bean (*Psophocarpus tetragonolobus*). *HortScience*, *57*(9), 1064-1069.

Castro, G. A. P., Hernández-Rodríguez, G., Becerra-Morales, D., Valle-Guadarrama, S., Cedillo-Portugal, E., & Guerra-Ramirez, D. (2026). Nutritional composition and functional potential of aktala'huat (*Parathesis psychotrioides*), a wild fruit traditionally consumed by Totonac communities in Mexico. Biotecnia, *28*, e2719-e2719.

Darmon, N., Darmon, M., Maillot, M., & Drewnowski, A. (2005). A nutrient density standard for vegetables and fruits: nutrients per calorie and nutrients per unit cost. *Journal of the American Dietetic Association*, *105*(12): 1881–1887. https://doi.org/10.1016/j.jada.2005.09.005

Dhingra, D., Michael, M., Rajput, H., & Patil, R. T. (2012). Dietary fibre in foods: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 49(3): 255–266. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0365-5

Edwards, M. E., Harris, E. M., Wagner, F. H., Cross, M. C., & Miller, G. S. (1988). seed germination of american pokeweed (*Phytolacca americana*) laboratory techniques and autotoxicity. *American Journal Of Botany*, *75*(12): 1794-1802. https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1988.tb11260.x

Finch-Savage, W. E., & Bassel, G. W. (2016). Seed vigour and crop establishment: Extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany, 67*(3), 567–591. https://doi.org/10.1093/jxb/erv490

Galarraga, E., Amaro-Luis, J. M., Rojas, L. B., Mitaine-Offer, A. C., & Lacaille-Dubois,

M. A. (2014). Triterpenos y saponinas triterpénicas de *Phytolacca icosandra* y *Phytolacca rugosa*. *Ciencia*, *22*(1), 53-66.

Hubert, B., Leprince, O. & Buitink, J. (2024). Sleeping but not defenceless: seed dormancy and protection. *Journal Of Experimental Botany*, *75*(19): 6110-6124. https://doi.org/10.1093/jxb/erae213

ISTA. (2024) International Rules for Seed Testing 2024. *International Rules For Seed Testing, 2024* (1): 1-14. https://doi.org/10.15258/istarules.2023.i

Kumar, B. M., Bhavya, G., De Britto, S., & Jogaiah, S. (2025). Wild edible plants for food security, dietary diversity, and nutraceuticals: a global overview of emerging research. *Frontiers In Sustainable Food System, 9*. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1686446

Longjam, R. & Kotiyal, A. (2024). Different pre-sowing treatments intensify the germination process and the seedling growth of fruit crops. *International Journal Of Advanced Biochemistry Research*, *8*(5): 541-546. https://doi.org/10.33545/26174693.2024.v8.i5g.1126

López Sandoval, J. A., Torres-Gutiérrez, P., Quintero-Bastida, S. L., Estrada-Campuzano, G., & Nieto-Trujillo, A. (2025). *Propuesta de nuevos cultivos a partir de plantas silvestres con potencial alimenticio*. *Agro-Divulgación*, *5*(6). https://doi.org/10.54767/ad.v5i6.494

Lestari, D. A., Renjana, E., Ningrum, L. W., Rahadiantoro, A., Firdiana, E. R., Mas' udah, S., ... & Latifah, D. (2024). Seed morphometry of selected plant species from bromo tengger semeru National Park, East Java, Indonesia: the significance in identification and dispersal. *International Journal of Conservation Science, 15*(4), 1855-1870.

Madrigal-González, D., Sánchez-Vargas, N. M., Gómez-Romero, M., Uribe-Salas, M. D., Martínez-Palacios, A., & Ramos-Ortiz, S. (2026). Caracteres morfométricos y patrones de germinación de semillas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. de diferentes procedencias. *Polibotánica*, *61*: 165-179. https://doi.org/10.18387/polibotanica.61.9

Maldonado-Peralta, M. de los Á., García de los Santos, G., García, N. J. R., Corona T. T., Cetina, A. V. M., & Ramírez, H. C. (2016). Calidad morfológica de frutos y endocarpios

del nanche rojo (*Malpighia mexicana*, Malpighiaceae). *Acta Botánica Mexicana*, *117*: 37–46. doi: https://doi.org/10.21829/abm117.2016.1166

Monroy-Vázquez, M. E., Peña-Valdivia, C. B., García-Nava, J. R., Solano-Camacho, E., Campos, H., & García-Villanueva, E. (2017). imbibición, viabilidad y vigor de semillas de cuatro especies de *Opuntia* con grado distinto de domesticación. *Agrociencia*, *51*(1): 27-42. http://www.redalyc.org/pdf/302/30249773004.pdf

Mapes, C., Guerrero, J. C. M., Rodríguez, L. P., Peña, F. A. B., Vargas, P. E. S., & Bautista, L. (2024). Composición nutrimental de hojas de *Amaranthus* 'Quintoniles'de la Sierra Norte de Puebla, México. *Etnobiología*, *22*(3), 210-242.

Murcia, M. A. (2020). Spinach. En M. S. J. Simmonds & V. R. Preedy (Eds.), *Nutritional Composition and Antioxidant Properties of Fruits and Vegetables* (pp. 181–195). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812780-3.00011-8

Ortiz-Trápala, V., Vibrans, H., Linares-Mazari, M. E., & Flores-Sánchez, D. (2026). Quelites entre cocineras tradicionales nahuas y totonacas de la Sierra Norte de Puebla, México. *Polibotánica*, (61), 385-407.

Strgulc Krajšek, S., Kladnik, A., Skočir, S., & Bačič, M. (2023). Seed germination of invasive Phytolacca americana and potentially invasive *P. acinosa*. *Plants*, *12*(5): 1052. https://doi.org/10.3390/plants12051052

Treyvaud, V., Marston, A., Dyatmiko, W., & Hostettmann, K. (2000). Molluscicidal saponins from *Phytolacca icosandra*. *Phytochemistry*, 55(6): 603–609. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)00233-8

Varsamis, G.; Merou, T.; Alexandropoulou, I.; Menti, C. & Karapatzak, E. (2025). Seed Germination Ecology and Dormancy Release in Some Native and Underutilized Plant Species with Agronomic Potential. *Agriculture*, *15*(20): 2139. https://doi.org/10.3390/agriculture15202139

Referencia electrónica

CONABIO. (2025). Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México.

https://www.biodiversidad.gob.mx/ (consultado en 30 de mayo del 2026)

Contenido mineral de semillas de frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) cultivados en la región Norte del estado de Guerrero, México

Oscar Martín Antúnez-Ocampo[45], Maria del Rosario Jacobo-Salcedo[46], Erika Nava-Reyna, José Luis Solís-Bonilla[47]

Resumen

En México, se sembraron aproximadamente 355 ha de frijol caupí (*V. unguiculata* L. Walp) en los estados de Yucatán, Quintana Roo, Tabasco y Campeche. En Guerrero, el frijol caupí se le conoce regionalmente como frijol chino, mongo, judío o chícharo de vaca, y se siembra en pequeñas superficies como monocultivo o en el sistema milpa, principalmente en condiciones de temporal, donde su cosecha se destina para el autoconsumo. El objetico fue determinar el contenido mineral de las semillas de frijol caupí (*V. unguiculata*) sembrados en la región Norte del estado de Guerrero. Los tratamientos fueron tres poblaciones recolectadas de frijol caupí. El diseño experimental fue completamente al azar, con tres repeticiones, cada una de 60 g de semilla. Los análisis de las semillas se realizaron en el laboratorio de suelos del CENID - RASPA del INIFAP, en Gómez Palacio, Durango, México**.** Las variables evaluadas fueron los contenidos de N, P, K, Ca y Mg, y de proteína. El contenido mineral de la semilla presentó variación significativa por efecto de la población de frijol caupí. El N varió de 3.93 a 5.35% y la proteína de 24.57 a 33.43%, el P de 0.51 a 0.80%, K de 0.16 a 1.65%, Ca de 0.09 a 0.42% y el Mg de 0.07 a 0.24%, siendo OX-2 la población más sobresaliente. El genotipo influyó en la calidad de la semilla, teniendo un orden de abundancia de N >K >P >Ca >Mg.

Palabras clave: frijol caupí, Guerrero, semilla, minerales.

Abstract

In Mexico, approximately 355 ha of cowpea (*V. unguiculata* L. Walp) were planted in 2023 across the states of Yucatán, Quintana Roo, Tabasco, and Campeche. In Guerrero, the cowpea is known regionally by names such as chinese bean, mongo, jewish, or cow pea; it is cultivated on small plots—either as a monoculture or within the cornfield system—primarily

[45] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) -Campo Experimental Iguala. Iguala de la Independencia, Guerrero. México. CP. 40000
[46] INIFAP-CENID RASPA. Gómez Palacio, Durango. México. CP. 35079
[47] INIFAP-Campo Experimental Rosario Izapa, Tuxtla Chico, Tapachula, Chiapas, México. CP. 30870. antunez.oscar@inifap.gob.mx, jacobo.rosario@inifap.gob.mx, nava.erika@inifap.gob.mx, solis.joseluis@inifap.gob.mx Autor de correspondencia: antunez.oscar@inifap.gob.mx

under rainfed conditions, with the harvest intended for household consumption. The objective was to determine the mineral content of cowpea (*V. unguiculata*) seeds planted in the northern region of Guerrero state. The treatments consisted of three collected cowpea populations. A completely randomized experimental design was used, with three replicates of 60 g of seed each. Seed analyses were conducted at the soil laboratory of CENID-RASPA (INIFAP) in Gómez Palacio, Durango, Mexico. The variables evaluated were N, P, K, Ca, and Mg content, as well as protein content. Seed mineral content showed significant variation depending on the cowpea population. N content ranged from 3.93% to 5.35% and protein from 24.57% to 33.43%; P ranged from 0.51% to 0.80%, K from 0.16% to 1.65%, Ca from 0.09% to 0.42%, and Mg from 0.07% to 0.24%, with the OX-2 population showing the most outstanding results. The genotype influenced seed quality, with an abundance order of N > K > P > Ca > Mg.

Keywords: cowpea, Guerrero, seed, minerals.

Introducción

En México, especialmente en la región Sur–Sureste se ha heredado una tradición culinaria altamente variada y saludable. Sin embargo, la modernización y el crecimiento de la industria alimentaria han elevado la demanda de proteínas, vitaminas y minerales de origen animal, cuyo costo aumenta año con año, lo que favorece el consumo de alimentos procesados, con alto contenido de grasas saturadas, azúcares y sal, que son menos saludables y de mayor densidad energética. Estos cambios en los hábitos alimenticios van disminuido poco a poco el consumo de platillos tradicionales basados en maíz, frijol y otros cultivos ricos en nutrimentos procedentes de la milpa (Márquez-Molina *et al*., 2025). Para superar estas problemáticas en la alimentación de la población del estado de Guerrero, los cultivos tradicionales como el frijol u otras leguminosas desempeñan un papel importante en la seguridad alimentaria de una comunidad o región, ya que son una fuente constante de alimentos, con alto contenido de proteínas, vitaminas y minerales, y son menos costosos que la carne (res, puerco o aves de corral), productos lácteos y mariscos, lo que ayuda a los agricultores de bajos ingresos económicos combatir la desnutrición proteica (Sáenz-Rojas *et al*., 2018; Arellano-Narváez *et al*., 2023).

En México, el SIAP en el 2023 reportó que se sembraron aproximadamente 355 ha de frijol caupí (*V. unguiculata* L. Walp) en los estados de Yucatán, Quintana Roo, Tabasco y Campeche, con rendimiento promedio de 2.71 t ha^{-1}. También, se reportaron pequeñas superficies en otros estados como Oaxaca, Guerrero, Chiapas, Tamaulipas y Baja California

Sur. En Guerrero, el frijol caupí se le conoce regionalmente como frijol chino, mongo, judío o chícharo de vaca, y se siembra en pequeñas superficies como monocultivo o asociado con maíz (*Zea mays* L.) en el sistema milpa, principalmente en condiciones de temporal, donde su cosecha se destina para el autoconsumo (Olivares-Pérez *et al*., 2025) Entre los genotipos que se siembran en el estado, destacan los de grano de color cobrizo, hueso, beige y negro (Figura 1). A pesar de la importancia del frijol caupí en la gastronomía y la dieta de la población guerrerense y en la región sur- sureste, se tienen pocos estudios sobre esta especie y del valor nutrimental de la semilla (Latournerie-Moreno *et al*., 2006). En este sentido, se planteó el objetivo de la investigación.

Determinar el contenido mineral de las semillas de frijol caupí (*Vigna unguiculata*) sembradas en la región Norte del estado de Guerrero. La hipótesis planteada fue que al menos una población de frijol caupí presenta un contenido mineral diferente al resto de las poblaciones recolectadas.

Materiales y métodos

Germoplasma

Se utilizaron semillas de frijol caupí con edad de un año, que fueron recolectadas directamente con productores de tres municipios de la región Norte del estado de Guerrero (Cuadro 1; Figura 1), donde la mayoría de ellos los cultivan en el sistema milpa, ya sea asociando o intercalado con maíz (*Zea mays* L.). Cada población de frijol caupí recolectada se resguardo en recipientes de plástico con capacidad de 1 L y se etiquetó con sus respectivos datos (coordenadas geográficas, nombre común y usos). Posteriormente, se conservaron en un cuarto con temperatura promedio de 18.3 °C, ubicado en el Campo Experimental Iguala.

Cuadro 1. Poblaciones de frijol caupí recolectadas en municipios de la región Norte del estado de Guerrero.

Municipio/Localidad	Altitud /Coordenadas	Código	Nombre común	Color principal de la semilla
Cuetzala del Progreso / Chilacachapa	1 660 msnm/ 18.2732,-99.7613	CU-8		Dorado
General Canuto A. Neri / Ixtepec	992 msnm/ 18.4768, -100.974	GC-3	Frijol chino	Dorado
Teloloapan/ Oxtotitlán	1 087 msnm/ 18.1894, -99.9316	OX-2		Café



Figura 1. Semillas de poblaciones de frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) recolectadas en la región Norte del estado de Guerrero.

Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos en estudio fueron tres poblaciones recolectadas de frijol, que localmente son conocidas como frijol chino o frijol ejotero (Figura 1). El diseño experimental utilizado fue completamente al azar, con tres repeticiones, donde cada repetición estuvo constituida por 60 g de semilla representativa de cada población.

Análisis químico de las semillas

Los análisis de las semillas se realizaron en el laboratorio de suelos del CENID - RASPA del INIFAP, en Gómez Palacio, Durango, México. Para la determinación de los minerales se siguieron los pasos descritos en el Manual de Laboratorio elaborado por Plenecassagne *et al*. (1997) y Handbook of Reference Methods for Plants Analysis de la CDC (Kalra, 1998) realizando un secado de la muestra a peso constante a 75 °C dentro de una estufa de aire forzado, después su trituración y homogenización a un tamaño de malla menor a 0.5 mm (polvo fino), posterior a esto se empleó una masa de 0.2 g de muestra para ser digestada con una mezcla ácida de nítrico – perclórico a 145 °C por 2 horas, llevando a casi sequedad y aforadas a 10 mL con agua destilada para su análisis por espectrofotometría de absorción atómica en un Analyst700 Perkin Elmer® (AACC, 2000). La cuantificación de potasio se hizo con muestras diluidas en agua; mientras que, la determinación de calcio y magnesio fue en muestras diluidas y adicionadas con lantano en solución ácida de ácido nítrico en proporción de 0.774 g L^{-1} y acidez del 1 %, para la cuantificación de micronutrientes (hierro, cobre, manganeso y zinc) se realizó a partir del digestado, en todos los casos se empleó la técnica de aspiración directa. El fósforo se determinó a partir del digestado empleando la técnica de colorimetría con desarrollo de color con solución mixta de molibdato - metavanadato de amonio, en un espectrofotómetro Jenway® modelo 73 UV/VIS, a una longitud de onda de 490 nm. El análisis del nitrógeno total consistió en una digestión Kjeldahl con mezcla catalítica para la destrucción completa de la muestra, posteriormente se utilizó una alícuota de la preparación digestada y se sometió al método de Berthelot para su cuantificación colorimétrica (Plenecassagne *et al*., 1997). El contenido de N de la semilla se multiplicó por 6.25 para obtener el contenido de proteína (Raya-Pérez *et al*.; 2014). Como control de calidad en las determinaciones analíticas se empleó el material de referencia certificado NIST® SRM® 1573a de hojas de tomate, logrando recobros (fracción de analito adicionada a una muestra de prueba previa al análisis) superiores al 95 % para los analitos citados. Finalmente, los contenidos de los minerales (N, P, K, Ca y Mg) y el de proteína se expresaron en porcentaje (%).

Análisis estadístico

Los resultados del análisis químico se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA, $\alpha \leq 0.05$) y a las variables que resultaron significativas se les realizó una prueba de comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$) con el programa Statistical Analysis System (SAS) versión 9.0 (SAS Institute 2002).

Resultados y discusión

El contenido mineral de la semilla presentó variación significativa ($\alpha \leq 0.05$) por efecto de la población de frijol caupí en estudio (Cuadro 2). El N varió de 3.93 a 5.35% y el de proteína de 24.57 a 33.43%, siendo la población OX-2 (5.35% N; 28.15% proteína) la más sobresaliente en estos indicadores y estadísticamente superior al resto de frijoles (N: 3.93 a 4.23%; proteína: 24.57 a 26.44%). En el caso de P, el contenido más alto se registró en las semillas del frijol GC-3 (0.80%), que fue estadísticamente superior a CU-8 (0.51%) y OX-2 (0.39%), siendo esta última población la que presentó el contenido más bajo de este mineral. En K, las semillas de los frijoles CU-8 (1.65%) y CU-4 p (1.55%) fueron las más sobresalientes; pero estadísticamente diferentes entre sí; no obstante, superaron a OX-2 (0.16%). Por otro lado, los contenidos más altos de Ca y Mg se registraron en las semillas de frijol caupí OX-2, quien fue la población que más destaco en estos indicadores; mientras que, las semillas de la población de GC-3 presentaron los menores contenidos de estos dos minerales.

Cuadro 2. Significancia estadística de los contenidos de macrominerales en semillas de frijol caupí cultivados en la región Norte del estado de Guerrero.

F. V.	N	Pro	P	K	Ca	Mg
p-evalue	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*
CU-8	*4.23 b*	*26.44 b*	*0.51 b*	*1.65 a*	*0.09 b*	*0.24 a*
GC-3	*3.93 b*	*24.57 b*	*0.80 a*	*1.55 b*	*0.06 c*	*0.07 b*
OX-2	*5.35 a*	*33.43 a*	*0.39 c*	*0.16 c*	*0.42 a*	*0.19 a*
Media	4.50	28.15	0.56	1.12	0.19	0.17
DMS	0.303	1.9438	0.0487	0.0895	0.0151	0.0579
R^2	0.97	0.97	0.99	0.99	0.99	0.93
C.V. (%)	2.69	2.75	3.44	3.19	3.19	13.86

C. V. = coeficiente de variación. *= significativo, $\alpha \leq 0.05$. N = nitrógeno. Pro = proteína (%N*6.25). P = fósforo. K = potasio. Ca = calcio. Mg = magnesio. DMS = diferencia mínima significativa. Medias con letras diferentes en cada columna son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$).

Los resultados encontrados son coherentes con los de Giami (2005) quien reportó que las semillas de *V. unguiculata* cultivadas en Nigeria presentan un contenido proteico variable, que va de 20.1 a 25.8%. Comportamiento similar también fue observado por Cardona-Villadiego *et al*. (2021) en Colombia, donde el contendió de proteína y de fósforo fue variable en semillas de nueve genotipos de *V. unguiculata*, teniendo valores promedios de 26.6 % de proteína y de 3.7 mg kg^{-1} de P. Cabe señalar que los valores obtenidos por estos autores están dentro del rango registrado en la presente investigación. Por otro lado, en México; Morales-Morales *et al*. (2019) encontraron diferencias en el contenido mineral (407.9 a1004.6 mg kg^{-1} de K y de 125.5 a 442.6 mg kg^{-1}) de semillas de 15 colectas de frijol *V. unguiculata* cultivados en la Península de Yucatán. En este contexto, Giami (2005) indicó que la composición química y las propiedades nutricionales de *V. unguiculata* varían considerablemente según el genotipo cultivado, o por las características morfológicas, condiciones edafoclimáticas y las prácticas culturales que los agricultores realizan durante el ciclo del cultivo (Astudillo y Blair 2008, Chavez-Mendoza y Sanchez 2017).

La relevancia de *V. unguiculata* es que es una leguminosa tropical-subtropical, que se desarrolla adecuadamente en ambientes hostiles donde otras leguminosas no prosperan, ya que tolera temperaturas altas (> 35 ºC), sequía, salinidad y una baja fertilidad del suelo; demás, tiene la capacidad de establecer simbiosis con *Rhizobium* y hongos micorrízicos, reduciendo la necesidad de fertilizantes y favoreciendo las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. En el aspecto nutricional, las hojas y semillas destacan por su alto contenido de proteínas (23-32%), carbohidratos, fibra dietética, hierro, zinc, vitamina C, tiamina, riboflavina, niacina, folato total, β-caroteno y ácidos grasos saturados, características que lo destacan para potencializar la alimentación humana (Devi *et al*., 2015; Morales-Morales *et al*., 2016). Es por ello que es un cultivo de gran importancia para el estado de Guerrero, principalmente porqué sus granos se consumen en seco y las vainas inmaduras, de igual manera se utiliza como cultivo forrajero (García-Hernández *et al*., 2005).

Conclusiones

Las semillas de *V. unguiculata* cultivadas en la región Norte del estado de Guerrero mostraron diferencias en el contenido de proteína y de macrominerales (P. K, Ca y Mg). En este sentido, el genotipo influyó en la calidad de la semilla, teniendo en orden de abundancia al N >K >P >Ca >Mg. En general, la variabilidad observada en el contenido mineral de los frijoles puede relacionarse con él genotipo y las prácticas agrícolas que utilizan los productores, y las condiciones edafoclimáticas donde se cultivan.

Agradecimientos

A los estudiantes de servicio social de la Universidad Autónoma del Estado de Guerrero (UAGro) y del Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero (CSAEGro).

Al financiamiento del proyecto “Agrodiversidad del frijol nativo del estado de Guerrero: una estrategia para la seguridad alimentaria ante el cambio climático, con número SIGI: 13385237350”.

Literatura citada

AACC. (2000). Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists. Vol. I y II.

Arellano-Narváez R., Escamilla-García P. E. & Zavala-Cortés A. (2023). Inocuidad y soberanía alimentaria en gastronomía tradicional del centro y Montaña de Guerrero: una revisión crítica. Estudios sociales. Revista de alimentación contemporánea y desarrollo regional *33*(62): e231337.

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 fríjol colombiana. Agronomía Colombiana 26 (3) ,471-476 (2008)

Cardona-Villadiego C. E., Araméndiz-Tatis H., Cardona-Ayala C. E. & Espitia-Camacho M. M. (2021). Evaluación agronómica y nutricional de ocho líneas de fríjol caupí (*Vigna unguiculata* [L.] WALP.). Revista de Investigación Agraria y Ambiental 12(1): 29-38.

Chavez-Mendoza C. & Sanchez, E. (2017). Bioactive compounds from mexican varieties of the common bean (*Phaseolus vulgaris*): Implications for health. Molecules 22: 1360.

Giami, S.Y. 2005. Compositional and nutritional properties of selected newly developed lines of cowpea (Vigna unguiculata (L.) Walp). J. Food Com. Anal. 18: 665-673.

Kalra Y. P. (1998). Handbook of Reference Methods for Plant Analysis. CRC Press, Boca Raton. Florida. 300 p.

Latournerie-Moreno L., Tuxill J., Moo E. Y., Reyes L. A., Alejo J. C. & Jarvis D. I. (2006) Traditional Maize Storage Methods of Mayan Farmers in Yucatan, Mexico: Implications for Seed Selection and Crop Diversity. Biodiversity & Conservation 15: 1771-1795.

Márquez-Molina O., Rojas- Contreras I. I. & Espinosa- Ayala E. (2025). Alimentos tradicionales: Tesoros de la cultura y pilares de la seguridad alimentaria. Revista Investigium IRE Ciencias Sociales Y Humanas 16(01): 183-208.

Morales-Morales A. E., Andueza-Noh R. H., Márquez-Quiroz C., Benavides-Mendoza A., Tun-Suarez J. M., González-Moreno A. & Alvarado-López J. C. (2019). Caracterización morfológica de semillas de frijol caupí (*Vigna unguiculata* L. Walp) de la Península de Yucatán. Ecosist. Recur. Agropec. 6(18): 463-475.

Morales-Morales A. E., de la Cruz-Lázaro E., Osorio-Osorio R., Sánchez C. E., Montemayor T. A., Márquez-Quiroz C. (2016). Contenido mineral y rendimiento de germinados de frijol caupí biofortificados Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 17: 3415-3425.

Olivares-Pérez J., Rodríguez M. S., Rojas H. S., Romero R. T., Damián V. M., Jiménez L. Vania & Sarabia S. L. (2025). Prácticas de manejo para la producción de (*Vigna ung*uiculata [L.] Walp) en productores del Municipio de Pungarabato, Guerrero, México. Polibotánica 60.

Plenecassagne A., Romero-Fierro E. & Lopez-Borrego C. (1997). Manual de Laboratorio, Analisis de suelos, aguas, plantas, Gomez Palacio: CENID RASPA.

Raya-Pérez J. C., Gutiérrez-Benicio G. M., Ramírez P. J. G., Covarrubias-Prieto J. & Aguirre Mancilla C. L. (2014). Caracterización de proteínas y contenido mineral de dos variedades nativas de frijol de México. Agronomía Mesoamericana 25: 01-11.

Sáenz-Rojas, S. J., Rivas-García, J. A., Paredes-Castillo, L. A. y Catín-Chiong, A. H. (2018). Evaluación del impacto de los pilares de la seguridad y soberanía alimentaria y nutricional SSAN en las familias de la comunidad la pavana, municipio de Somotillo-2014. Revista Iberoam. Bioecon. Cambio Clim., 4(8): 924-953.

SAS Institute. (2002). SAS/STAT User's Guide. Version 9.1. Volumes 1 - 7. SAS Institute. Cary, NC, USA.

Contenido mineral de semillas de frijol cultivados en la región Norte del estado de Guerrero, México

Oscar Martín Antúnez-Ocampo[48], Maria del Rosario Jacobo-Salcedo[49], Erika Nava-Reyna, José Luis Solís-Bonilla[50]

Resumen

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es uno de los cultivos prioritarios de México, y se encuentra dentro del marco de la soberanía alimentaria, en virtud de que representa un alimento básico para la población rural y urbana del país, ya que el grano provee la mayor cantidad de proteína y minerales. El objetivo fue determinar el contenido mineral de las semillas de poblaciones de frijol cultivadas en la región Norte del estado de Guerrero. Se utilizaron semillas de frijoles recolectados en tres municipios de la región Norte de Guerrero. Los tratamientos en estudio fueron 13 poblaciones de frijol y el diseño experimental fue completamente al azar, con tres repeticiones. Los análisis químicos de las semillas se realizaron en el laboratorio de suelos del CENID - RASPA del INIFAP, en Gómez Palacio, Durango, México. El contenido de N osciló de 2.55 a 5.05% y de proteína de 15.91 a 31.57%. En el caso del P varió de 0.37 a 0.73%, k de 0.16 a 2.37%, Ca de 0.08 a 0.62% y Mg de 0.02 a 0.26%. La heterogeneidad observada en el contenido nutricional de la semilla de los frijoles puede relacionarse con la diversidad genética de la especie y su conservación *in situ*, ya que cada agricultor las preserva por generaciones.

Palabras clave: frijol, Guerrero, semilla, minerales.

Abstract

The common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a priority crop in Mexico and is central to food sovereignty, as it serves as a staple food for both the country's rural and urban populations, providing a significant source of protein and minerals. The objective of this study was to determine the mineral content of seeds from bean populations grown in the Northern region of the state of Guerrero. Seed samples were collected from three municipalities in this region. The study evaluated 13 bean populations using a completely randomized experimental design

[48] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) -Campo Experimental Iguala. Iguala de la Independencia, Guerrero. México. CP. 40000
[49] INIFAP-CENID RASPA. Gómez Palacio, Durango. México. CP. 35079
[50] INIFAP-Campo Experimental Rosario Izapa, Tuxtla Chico, Tapachula, Chiapas, México. CP. 30870. antunez.oscar@inifap.gob.mx, jacobo.rosario@inifap.gob.mx, nava.erika@inifap.gob.mx, solis.joseluis@inifap.gob.mx Autor de correspondencia: antunez.oscar@inifap.gob.mx

with three replicates. Chemical analyses of the seeds were conducted at the soil laboratory of INIFAP's CENID-RASPA center in Gómez Palacio, Durango, Mexico. Nitrogen content ranged from 2.55% to 5.05%, and protein content from 15.91% to 31.57%; levels for other minerals varied as follows: P (0.37–0.73%), K (0.16–2.37%), Ca (0.08–0.62%), and Mg (0.02–0.26%). The observed variation in seed nutritional content may be linked to the species' genetic diversity and its *in situ* conservation, given that individual farmers preserve these varieties over generations.

Keywords: bean, Guerrero, seed, minerals.

Introducción

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es uno de los cultivos prioritarios de México, y se encuentra dentro del marco de la soberanía alimentaria, en virtud de que representa un alimento básico para la población rural y urbana del país, ya que el grano provee la mayor cantidad de proteína (14 a 33 %)(Jacinto-Hernández *et al*., 2002), fibra dietética (15.5 a 21.0 g), almidón, ácido α-linolénico y minerales (fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, cobre, zinc) (Gomes Basso Los *et al*., 2018; Corzo-Ríos *et al*., 2020). También, contiene compuestos bioactivos como ácidos fenólicos, flavonoles, isoflavonas, taninos, antocianinas y procianidinas (Chávez-Mendoza *et al*., 2019); propiedades benéficas para la prevención y control de la obesidad, diabetes, enfermedades cardiovasculares y cáncer (Armendáriz-Fernández *et al*., 2019).

Una porción (90 g o ½ taza de frijoles cocidos) proporciona de 7 a 8 g de proteína, casi el 15% de la ingesta dietética recomendada de proteína para un adulto de 70 kg (Paredes, Becerra y Tay, 2008); lo cual es relevante porque en México existe un nivel elevado de desnutrición (energético-proteínica), principalmente en las zonas rurales y urbanas marginales de los estados de Oaxaca, Chiapas, Veracruz, Guerrero y Michoacán, teniendo en cuenta que la comunidad indígena representa el 23% de la población nacional (Boege, 2009). El consumo anual *per cápita* de frijol es de 9.9 kg; además, la producción nacional cubre casi la totalidad de los requerimientos de consumo de los mexicanos.

El consumo de frijoles se relaciona con beneficios para la salud humana, como la disminución de los niveles de colesterol y enfermedades cardíacas, esto último debido a que se ha demostrado que la alimentación a largo plazo con frijoles disminuye los niveles de colesterol y lipoproteína de baja densidad (LDL), por lo que ofrece una protección contra enfermedades cardiovasculares (Marzolo *et al*., 1993). Otros beneficios son protección contra el cáncer, la diabetes y la obesidad, debido a sus propiedades antioxidantes (compuestos fenólicos:

taninos y flavonoides), antimutagénicas y antiproliferativas (Abdulrahman *et al*., 2020). Es importante mencionar que los frijoles crudos contienen varios componentes antinutricionales, que pueden limitar su consumo.

En México, la producción de frijol se realiza extensivamente en casi todas las condiciones agroecológicas y sistemas de productivos (Vidal-Barahona *et al*. 2006); pero, en las áreas rurales se cultiva comúnmente en el sistema productivo de la milpa (maíz: Z*ea mays;* calabaza: *Cucurbita* sp.; chile: *Capsicum* sp.; quelite: *Amaranthus* sp.), especies que son cosechadas en temporal (Márquez-Quiroz *et al*. 2015). A pesar de su importancia en la dieta de la población mexicana, se tienen pocos estudios sobre el valor nutrimental del grano o semilla de los frijoles cultivados en el Sur de México, específicamente en el estado de Guerrero, el cual cuenta con una amplia diversidad de especies de *Phaseolus*. Objetivo

Determinar el contenido mineral de las semillas de poblaciones de frijol cultivadas en la región Norte del estado de Guerrero. La hipótesis planteada fue que al menos una población de frijol presenta un contenido mineral diferente al resto de las poblaciones recolectadas.

Materiales y métodos

Germoplasma

Se utilizaron semillas con edad de un año, de frijoles recolectados directamente con agricultores de tres municipios de la región Norte del estado de Guerrero (Cuadro 1), donde la mayoría de ellos cultivan el frijol en el sistema milpa, ya sea asociando o intercalado con maíz (*Zea mays* L.) y otras especies como calabaza (*Cucurbita* spp.). Cada población de frijol recolectada se resguardo en recipientes de plástico con capacidad de 1 L y se etiquetó con sus respectivos datos (coordenadas geográficas, nombre común y usos). Posteriormente, se conservaron en un cuarto con temperatura promedio de 18.3 °C, ubicado en el Campo Experimental Iguala.

Cuadro 1. Poblaciones de frijol recolectadas en municipios de la región Norte del estado de Guerrero.

Municipio/Localidad	Coordenadas	Altitud (msnm)	Código	Nombre común	Color principal de la semilla
	18.1334 LA; -99.9319 LO;	1208	APC-1	Frijol rayado	Marrón oscuro

Apaxtla de Castrejón/Cabecera municipal			APC-2	Frijol negro	Negro
			APC-3	-	
Cuetzala del Progreso/Apetlanca	18.2096 LA; -99.7905 LO	1731	AP-1	Flor de mayo	Rosa
			AP-2	Frijol de guía	Negro
Cuetzala del Progreso/ Cabecera municipal	18.075 LA; -99.494 LO	1116	CU-1	Frijol blanco	Blanco
			CU-2	Frijol de mayo	Rosa
			CU-3,	-	Rojo oscuro
			CU-4	-	Rojo oscuro
			CU-5	-	Malva
			CU-6	Frijol café	Marrón claro
General Canuto/ Acapetlahuaya	18.4366 LA; -100.1323 LO	1176	GC-5	Frijol de caña	Rosa
General Canuto/ Providencia	18.4036 LA; -100.1433 LO	1256	GC-6	Frijol amarillo	Amarillo

Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos en estudio fueron 13 poblaciones de frijol recolectadas (Figura 1), que localmente son conocidos por el color del grano y habito de crecimiento de la planta. El diseño experimental utilizado fue completamente al azar, con tres repeticiones, donde cada repetición estuvo constituida por 60 g de semilla representativa de cada población.



CU-1



CU-2



CU-6



GC-3



GC-5



GC-6



AP-1 **APC-1** **APC-2**

Figura 1. Semillas de las poblaciones de frijol recolectadas en la región Norte del Estado de Guerrero.

Análisis químico de las semillas

Los análisis de las semillas se realizaron en el laboratorio de suelos del CENID - RASPA del INIFAP, en Gómez Palacio, Durango, México. Para la determinación de los minerales se siguieron los pasos descritos en el Manual de Laboratorio elaborado por Plenecassagne *et al*. (1997) y Handbook of Reference Methods for Plants Analysis de la CDC (Kalra, 1998) realizando un secado de la muestra a peso constante a 75 °C dentro de una estufa de aire forzado, después su trituración y homogenización a un tamaño de malla menor a 0.5 mm (polvo fino), posterior a esto se empleó una masa de 0.2 g de muestra para ser digestada con una mezcla ácida de nítrico – perclórico a 145 °C por 2 horas, llevando a casi sequedad y aforadas a 10 mL con agua destilada para su análisis por espectrofotometría de absorción atómica en un Analyst700 Perkin Elmer® (AACC, 2000). La cuantificación de potasio se hizo con muestras diluidas en agua; mientras que, la determinación de calcio y magnesio fue en muestras diluidas y adicionadas con lantano en solución ácida de ácido nítrico en proporción de 0.774 g L^{-1} y acidez del 1 %, para la cuantificación de micronutrientes (hierro, cobre, manganeso y zinc) se realizó a partir del digestado, en todos los casos se empleó la técnica de aspiración directa. El fósforo se determinó a partir del digestado empleando la técnica de colorimetría con desarrollo de color con solución mixta de molibdato - metavanadato de amonio, en un espectrofotómetro Jenway® modelo 73 UV/VIS, a una longitud de onda de 490 nm. El análisis del nitrógeno total consistió en una digestión Kjeldahl con mezcla catalítica para la destrucción completa de la muestra, posteriormente se utilizó una alícuota de la preparación digestada y se sometió al método de Berthelot para su

cuantificación colorimétrica (Plenecassagne *et al*., 1997). El contenido de N de la semilla se multiplicó por 6.25 para obtener el contenido de proteína (Raya-Pérez *et al*.; 2014). Como control de calidad en las determinaciones analíticas se empleó el material de referencia certificado NIST® SRM® 1573a de hojas de tomate, logrando recobros (fracción de analito adicionada a una muestra de prueba previa al análisis) superiores al 95 % para los analitos citados. Finalmente, los contenidos de los minerales (N, P, K, Ca y Mg) y el de proteína se expresaron en porcentaje (%).

Análisis estadístico

Los resultados del análisis químico se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA, $\alpha \leq 0.05$) y a las variables que resultaron significativas se les realizó una prueba de comparación de medias (Tukey, $p \leq 0.05$) con el uso del programa Statistical Analysis System (SAS) versión 9.0 (SAS Institute 2002).

Resultados y discusión

El contenido mineral de las semillas mostró variación significancia ($\alpha \leq 0.05$) por efecto de la población de frijol en estudio (Cuadro 2). El contenido de N osciló de 2.55 a 5.05% y de proteína de 15.91 a 31.57%, siendo los frijoles más sobresalientes estadísticamente los de APC-3 (N: 5.05%; proteína: 31.57%) y GC-5 (N: 5.02%; proteína: 31.38%), CU-5 (N: 9.94%; proteína 30.86%) y CU-6 (N: 4.87%; 30.42%); mientras que, los contenidos más bajos se registraron en las semillas de AP-1 (24.01% proteína), GC-6 (N: 3.71%; proteína: 23.19%) y CU-1 (N: 2.55%; proteína: 15.91%).

Cuadro 2. Significancia estadística de los contenidos de macrominerales en semillas de poblaciones de frijol cultivadas en la región Norte del estado de Guerrero.

F. V.	N	Pro	P	K	Ca	Mg
Valor *p*-evalue	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*	0.0001*
R^2	0.99	0.99	0.99	0.96	0.99	0.92
C.V. (%)	2.05	2.06	2.36	15.90	6.65	20.48
Media	4.29	26.82	0.53	1.17	0.21	0.14

C. V. = coeficiente de variación. *= significativo, $\alpha \leq 0.05$. N = nitrógeno. Pro = proteína (%N*6.25). P = fósforo. K = potasio. Ca = calcio. Mg = magnesio.

En el caso de P, los contenidos más altos se registraron en semillas de los frijoles AP-1 (0.70%) y GC-5 (0.73%), posteriormente le siguen CU-2, CU-3, GC-6 y APC-2; mientras que, las semillas de CU-5, CU-6 y APC-3 registraron los contenidos más bajos de este mineral.

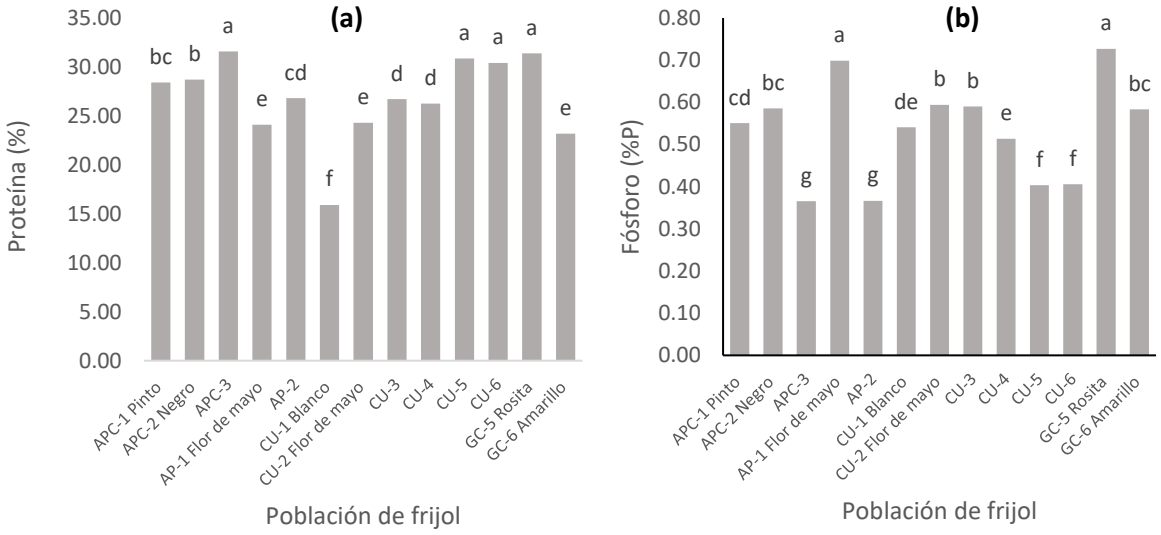


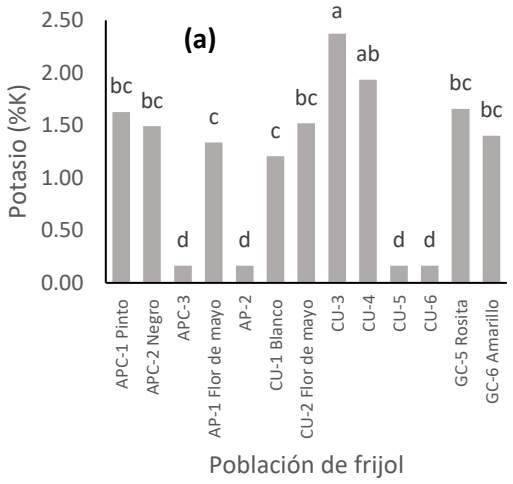
Figura 2. Contenido de proteína (a) y fósforo (b) en semillas de poblaciones de frijol cultivadas en la región norte de Guerrero. DMS(a) = 1.64. DMS(b) = 0.04.

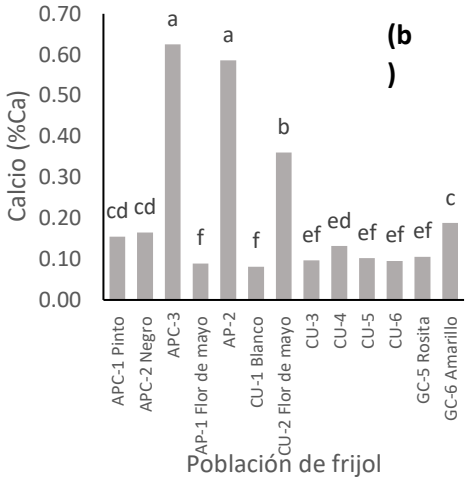
La relevancia del frijol como fuente de proteína se debe a qué una porción de 90 g (o media taza) de frijol cocinado, aporta de 7 a 8 g de proteína, cerca del 15% de la ingesta diaria recomendada (IDR) por la FAO para un adulto (70 kg) (Suárez-Martínez *et al*., 2015). En este sentido, en la población mexicana se recomienda una IDR de proteína de 73.0 g (NORMA Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008). Además, esta proteína tiene una digestibilidad de 65 a 85% en el organismo, dependiendo de la variedad del frijol y el método de cocción (Suárez Martínez *et al*., 2015).

Diversos autores han documentado que las variedades de frijol mexicanas presentan de 14 a 33% de proteína (Gomes Basso Los et al., 2018; Corzo-Ríos et al., 2020). Por ejemplo, en frijol negro se reportó 21.8% (Serrano y Goñi, 2004), llegando alcanzar hasta 24% (Pérez-Herrera et al., 2002; Montoya et al., 2008), en frijol Bayo Berrendo se obtuvo 16.47% y

14.53% para frijol Patzcuareño (Raya-Pérez et al., 2014); mientras que, el Bayo Río Grande registró 23.3% (Vargas-Avila y Villamil-Lozano, 2012). (Guzmán-Maldonado et al., 2000).

En K, las semillas de los frijoles CU-3 (2.37%) y CU-4 p (1.93%) fueron las más sobresalientes, que el resto, con diferencia superior al 70% con respecto al contenido más bajo, que se obtuvo en semillas de las poblaciones de APC-3, AP-2, CU-5 y CU-6. En el caso de Ca, las poblaciones más destacadas estadísticamente fueron APC-3, AP-2 y CU-2 cuyas semillas registraron los mayores contenidos entre 0.36 y 0.62% de Ca; mientras que, los menores contenidos se tuvieron en semillas de AP-1 (0.09%) y CU-1 (0.08%). En Mg, destacaron por su contenido (0.18 a 0.26%) las semillas de CU-3, CU-4 y AP-2; en contraste, las semillas de CU-1 (0.02%), AP-1 (0.05%), GC-5 (0.06%) y GC-6 (0.06%) registraron los contenidos más bajos de este mineral.





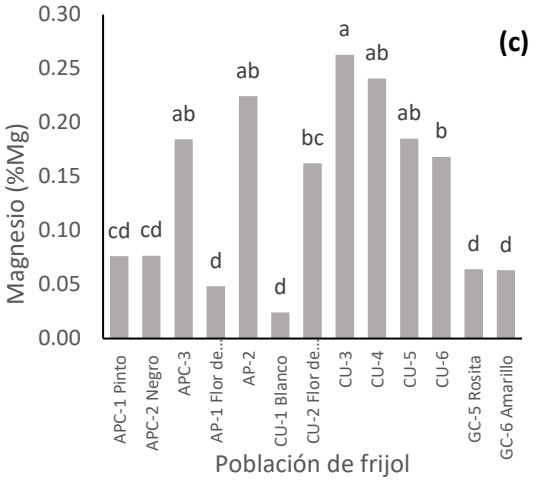


Figura 3. Contenido de potasio (a), calcio (b) y magnesio (c) en semillas de poblaciones de frijol cultivadas en la región norte de Guerrero. DMS(a) = 0.55, DMS(b) = 0.04, DMS(c) = 0.08.

En estudios relacionados al contenido mineral, en Chile se observó que los contenidos de P, K, Ca, Mg y Na de los frijoles variaron ligeramente entre genotipos. Es decir, el contenido de P osciló de 0.4 a 0.6 %, donde un solo genotipo presentó el valor más alto. El contenido de K varió entre 1.42 y 1.84 %, el Ca de 0.10 a 0.26 %, el Mg de 0.13 y 0.23 %; mientras que, el Na varió entre 0.003 y 0.012 % (Paredes *et al*., 2009). En variedades mexicanas de frijol se reportaron contenidos de 0.13 a 0.75 % de Ca, 1.47 a 2 % de K y 0.19 a 0.27 % de Mg (Amirul-Islam *et a*l., 2006); por ejemplo, los granos de frijol de la variedad Bayo Berrendo presentaron 0.15 % de Ca, 5.53 % de K y 0.60 % de Mg, en cambio, la variedad Patzcuareño presentó 0.17 % de Ca, 3.52 % K y 0.67 % Mg (Raya Pérez *et al*., 2014).

El contenido de algunos minerales descritos anteriormente contrata con los obtenidos en la presente investigación; por ejemplo, el P fue mayor en las poblaciones de frijol de Guerrero, mientras que, el rango de contenido de K fue similar entre estudios; sin embargo, los contenidos de Ca y Mg fueron menores en las poblaciones de Guerrero en comparación con los frijoles provenientes de Chile (Paredes *et al*., 2009) y frijoles Bayo Berrendo y Patzcuareño; pero superiores al contenido reportado por la USDA (2011). Estas diferencias en contenidos de minerales en la semilla se relacionan con factores genéticos (variedad),

condiciones agroclimáticas donde fueron cultivadas y el manejo del cultivo, destacando el tipo de suelo donde se desarrolla la planta. Se ha documentado que el contenido de Na, Mg y Ca en la semilla es menor que en otras partes de la planta, debido a la movilidad de estos minerales. Situación contraría ocurre para el contenido de N y P al ser mayor; mientras que, el K se distribuye más uniformemente en las plantas maduras en comparación con N, P, Ca, Mg y Na (Moraghan y Grafton, 1997).

Conclusiones

Las semillas de las poblaciones de frijol recolectadas en la región Norte del estado de Guerrero mostraron diferencias en el contenido de proteína, y macronutrientes primarios (N P. K) y secundarios (Ca, Mg). La heterogeneidad observada en el contenido nutricional de la semilla de los frijoles puede relacionarse con la diversidad genética de la especie y su conservación *in situ*, ya que cada agricultor las preserva por generaciones; además de las prácticas agrícolas y condiciones edafoclimáticas donde se cultivan.

Agradecimientos

A los estudiantes de servicio social de la Universidad Autónoma del Estado de Guerrero (UAGro) y del Colegio Superior Agropecuario del Estado de Guerrero (CSAEGro).

Al financiamiento del proyecto “Agrodiversidad del frijol nativo del estado de Guerrero: una estrategia para la seguridad alimentaria ante el cambio climático, con número SIGI: 13385237350”.

Literatura citada

AACC. (2000). Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists. Vol. I y II.

Abdulrahman B. O., Bala M. & Bello O. M. (2020). Bioactive Compounds of Black Bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In: Bioactive Compounds in Underutilized Vegetables and Legumes. Murthy H. N., Paek K. Y. (eds) Reference Series in Phytochemistry. Springer, Cham.1-20.

Armendáriz-Fernández K. V., Herrera-Hernández I. M., Muñoz-Márquez E. & Sánchez E. (2019). Characterization of bioactive compounds, mineral content, and antioxidant activity in bean varieties grown with traditional methods in Oaxaca, Mexico. Antioxidants, 26: 1-17.

Boege E. (2009). Centros de origen, pueblos indígenas y diversificación del maíz. Ciencias 92-93: 18-28.

Chávez-Mendoza C., Hernández-Figueroa K. & Sánchez E. (2019). Antioxidant Capacity and Phytonutrient Content in the Seed Coat and Cotyledon of Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) from Various Regions in Mexico. Antioxidants 8: 1-19.

Corzo-Ríos L. J., Sánchez-Chino X. M., Cardador-Martínez A., Martínez-Herrera J. & Jiménez Martínez C. (2020). Effect of cooking on nutritional and non-nutritional compounds in two species of Phaseolus (*P. vulgaris* and *P. coccineus*) cultivated in México. International Journal of Gastronomy and Food Science, 20: 1-7.

Gomes Basso Los F., Zielinski A. A. F., Wojeicchowski J. P., Nogueira A. & Demiate I. M. (2018). Beans (*Phaseolus vulgaris* L.): whole seeds with complex chemical composition. Current Opinion in Food Science, 19: 63-71.

Kalra Y. P. (1998). Handbook of Reference Methods for Plant Analysis. CRC Press, Boca Raton. Florida. 300 p.

Márquez-Quiroz C., De-la-Cruz-Lázaro E., Osorio-Osorio R. & Sánchez C. R. (2015). Biofortification of cowpea beans with iron: iron´s influence on mineral content and yield. Journal of Soil Science and Plant Nutrition 15: 839-847.

Marzolo M. P., Amigo L. & Nervi F. (1993). Hepatic production of very low density lipoprotein, catabolism of low density lipoprotein, biliary lipid secretion, and bile salt synthesis in rats fed a bean (*Phaseolus vulgaris*) diet. Journal of Lipid Research 34: 807-814.

Moraghan J. T. & Grafton K. F. (1997). Acumulación de Ca en cultivares de frijol que difieren en tamaño de semilla. J. Sci. Food Agric. 74: 251-256.

Mullins, A. P. &Arjmandi, B. H. (2021). Health benefits of plant-based nutrition: focus on beans in cardiometabolic diseases. Nutrients 13(2): 519.

Muñoz-Velázquez E. E., Rubio-Hernández D., Bernal-Lugo I., Garza-García R. & Jacinto Hernández C. (2009). Caracterización de genotipos nativos de frijol del estado de Hidalgo, con base a calidad del grano. Agricultura técnica en México 35(4): 429-438.

Norma Oficial Mexicana NOM-247-SSA1-2008. Productos y servicios. Cereales y sus productos. Cereales, harinas de cereales, sémolas o semolinas. Alimentos a base de: cereales, semillas comestibles, de harinas, sémolas o semolinas o sus mezclas. Productos de

panificación. Disposiciones y especificaciones sanitarias y nutrimentales. Métodos de prueba. En: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5100356&fecha=27/07/2009#gsc.tab=0.

Paredes M., Becerra V. & Tay J. (2009). Inorganic nutritional composition of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes race Chile. Chilean Journal of Agricultural Research 69: 486-495.

Plenecassagne A., Romero-Fierro E. & Lopez-Borrego C. (1997). Manual de Laboratorio, Analisis de suelos, aguas, plantas, Gomez Palacio: CENID RASPA.

Raya-Pérez J. C., Gutiérrez-Benicio G. M., Ramírez P. J. G., Covarrubias-Prieto J. & Aguirre Mancilla C. L. (2014). Caracterización de proteínas y contenido mineral de dos variedades nativas de frijol de México. Agronomía Mesoamericana 25: 01-11.

SAS Institute. (2002). SAS/STAT User's Guide. Version 9.1. Volumes 1 - 7. SAS Institute. Cary, NC, USA.

Serrano J. y Goñi I. (2004). Papel del frijol negro Phaseolus vulgaris en el estado nutricional de la población guatemalteca. Archivos Latinoamericanos de Nutrición 54: 36-44.

Suárez-Martínez S. E., Ferriz-Martínez R. A., Campos-Vega R., Elton-Puente J. E., de la Torre Carbot K. & García-Gasca T. (2015). Bean seeds: leading nutraceutical source for human health. CyTA - Journal of Food 14(1), 131-137.

USDA. (2011). National Nutrient Database for Standard Reference Release 27. Agricultural Research Service. National Agricultural Library. Retrieved from http://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods

Vidal-Barahona A., Lagunes-Espinoza L. del C, Valadez-Moctezuma E. & Ortiz-García C. F. (2006). Variabilidad morfológica y molecular de cultivares criollos y mejorados de frijol común en Tabasco, México Revista Fitotecnia Mexicana 29(4): 273-281.

Desarrollo del grano de polen y pared de la antera de *Tigridia pavonia* (L.F.) D.C.

Aída Carrillo Ocampo[51], Hilda Araceli Zavaleta Mancera[52], E. Mark Engleman[†]

Resumen

Tigridia pavonia (Iridaceae), es una monocotiledónea nativa del continente americano, poco se sabe sobre su biología reproductiva. El objetivo de este trabajo fue estudiar la ontogenia de los granos de polen y la pared de la antera. Las primeras etapas del desarrollo floral ocurren dentro de bulbos subterráneos que se obtuvieron de plantas silvestres en el Estado de México. Las anteras en diferentes etapas de desarrollo se procesaron para microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Durante la microsporogénesis se produjeron tétradas tetraédricas e isobilaterales, y la meiosis I ocurrió dentro del bulbo; este proceso es asíncrono en la misma antera, en la misma flor y en la misma inflorescencia. El tapete es secretor y lobulado en la etapa de tétrada. Los granos de polen son bisulcados y se dispersan en grupos unidos por polenkit e hilos de viscina, una característica poco común en las monocotiledóneas. La exina es intectada reticulada, heterobrocada y curvimurada, pili fusionados, y numerosas espículas basales en forma de gránulos. En la antesis, el polen es binucleado. La pared de la antera inicia con 4-5 estratos; durante el desarrollo los estratos intermedios se aplastan y a la madurez el endotecio desarrolla engrosamientos de pared celular retículo-helicoidales. La epidermis de la antera tiene estomas anomocíticos y cutícula reticulada, cada teca desarrolla una costilla dorsal con células epidérmicas con paredes elevadas. Esta es la primera descripción anatómica del desarrollo del polen y la antera para la tribu Tigridieae y para *T. pavonia*.

Palabras clave: Iridaceae; Tigridieae; pared-antera; microsporogénesis; granos de polen.

Abstract

Tigridia pavonia (Iridaceae), is a monocot native to the Americas, little is known about its reproductive biology. The aim of this work was to study the ontogeny of pollen grains and

[51] Área de Biología, Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México-Texcoco, 56230, Estado de México, México. acarrilloo@chapingo.mx
[52] Programa de Botánica, Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas Campus Montecillo, Montecillo, Texcoco 56264, Estado de México, México. arazavaleta@colpos.mx

the anther wall. The first stages of floral development occur within underground bulbs that were obtained from wild plants in the State of Mexico. The anthers at different stages of development were processed for optical microscopy and scanning electron microscopy. Tetrahedral and isobilateral tetrads occurred during microsporogenesis, and meiosis I occurred within the bulb; this process is asynchronous in the same anther, in the same flower and in the same inflorescence. The tapetum is secretory and lobed in the tetrad stage. Pollen grains are bisulcate, curvimurate and they dispersed in clusters joined by pollenkitt and viscin threads, an uncommon feature in monocotyledons. The pollen exine is reticulate intectated, heterobrocated and curvimurate, fused pili, and numerous basal spicules in the form of granules. At anthesis, pollen is binucleated. The anther wall begins with 4-5 cell strata; during development the intermediate strata shrink and at maturity the endothecium develops reticular-helicoidal cell wall thickenings. The epidermis of the anther has anomocitic stomata and reticulated cuticle, each theca develops a dorsal rib with epidermal cells with raised walls. This is the first anatomical description of pollen and anther development for the tribe Tigridieae and for *T. pavonia*.

Key words: Iridaceae; Tigridieae; anther wall; microsporogenesis; pollen grain.

Introducción

Tigridia pavonia es una monocotiledónea del continente americano que ha recibido especial atención, por sus flores grandes (10-15 cm de diámetro), Calderón y Rzedowsky,1990. Los tépalos muestran colores vistosos, de patrones moteados que sugieren el pelaje de un ocelote, de ahí el nombre nahuatl “oceloxochitl”. Desde tiempos precolombinos las flores se han usado en liturgias y como ornato, y los bulbos como alimento y medicina (Vázquez-García et al., 2001) *T. pavonia* pertenece a la familia Iridaceae, subfamilia Iridoideae, tribu Tigridieae, subtribu Tigridiinae. Iridaceae es una de las familias monofiléticas más grandes del orden Asparagales (Goldblatt et al., 2008). La tribu Tigridieae abarca los 500-2,800 m de altitud, 15-30º de latitud y 92-109º de longitud, región que incluye a 25 estados de la República Mexicana (Munguía-Lino et al, 2015).

A partir de la evolución y diversidad de las funciones y el desarrollo de la antera en angiospermas es posible entender las relaciones entre la diferenciación celular y la degeneración de tejidos en la pared de la antera con el origen y desarrollo del polen (Davis, 1966; Astrand et al.,2021). Existe variación en el tipo de desarrollo de la pared de la antera y del grano de polen entre familias de un mismo orden (Nadot et al.,2006) y entre especies de una misma familia (Johri, 1992). Dentro de la familia Iridaceae, se ha encontrado

desarrollo de la pared de la antera tipo dicotiledóneo (Chichiriccó,1989; Zhang et al. 2011; Fan et al., 2019) y monocotiledóneo (Gupta y Nanda, 1973), así como un tipo de citocinesis intermedio (Lakshmanan y Philip, 1971). Estas observaciones todavía no son bien comprendidas (Penet et al. 2005, 2007). No se halló ningún estudio sobre el desarrollo de la pared de la antera y desarrollo del grano de polen de la tribu Tigrideae y tampoco del género *Tigridia*. En la literatura consultada solo se encontró la descripción del grano de polen maduro realizada en cinco colectas mexicanas de *T. pavonia*, en donde destacan la variación en la forma, tamaño, y microestructura de la pared del polen de esta especie (Rudall y Wheeler, 1988). La terminología utilizada para la descripción palinológica es muy amplia, en el presente artículo se basó en Shivana (2003). El endotecio de 44 especies de Iridaceae, de las cuatro subfamilias y sus principales tribus fueron revisados, pero el género *Tigridia* no está incluido (Manning y Goldblatt,1990). Estos autores encontraron que el patrón de variación del endotecio permitió establecer relaciones entre tribus y géneros que concordaran con la filogenia propuesta para Iridaceae (Goldblatt,1990). A partir del siglo XX ha habido un creciente interés por estudiar la biología de la antera tanto para entender su desarrollo, como para fines prácticos de mejoramiento de cultivos mediante ingeniería genética (Cuevas-García, 2009). Algunos autores (Fernández-Gómez et al., 2015; 2020) coinciden en que es indispensable un mejor conocimiento del desarrollo del polen y de la antera, así como de los mecanismos que controlan la infertilidad masculina para la generación de semillas híbridas y para evitar flujo de polen entre distintas variedades. En México se han descrito nueve variedades silvestres de *T. pavonia* (Vázquez-García, 2001). La microscopía Electrónica de Barrido (MEB) proporciona información detallada estructural que la Microscopía de Luz (ML) no aporta. La presente investigación es un estudio original acerca del desarrollo del grano de polen y pared de la antera de *T. pavonia*, mediante técnicas de ML y MEB, con el propósito de obtener información sobre las características anatómicas e histológicas de los tejidos involucrados en estos procesos, a fin de aportar conocimiento de las estructuras reproductoras masculinas, que permita comprender la biología reproductiva de la familia Iridaceae.

Materiales y métodos

Obtención del material vegetal. Se obtuvieron bulbos subterráneos de plantas completas (Fig. 1. A) creciendo en una huerta en descanso ubicada en San Miguel Tlaixpan, Texcoco, estado de México, Latitud:19.51944444°, Longitud: -98.8125°, a 2405 msnm. Temperatura media anual máxima 22.1°C, mínima 7.4°C, media 14.8°C; precipitación media anual 616.7 mm. (Datos de 1961-1990), Estación 15101, Comisión Nacional del Agua, s.f.). Se

depositaron ejemplares herborizados con número de registro 36230, en el Herbario-Hortorio, Jorge Espinosa Salas, de la Preparatoria Agrícola, UACh. El desarrollo de la antera inicia en el interior del bulbo subterráneo condición que imposibilitó el marcaje de las inflorescencias y asignación de edades (Fig. 1. A). Para este trabajo se asignaron 7 estados de desarrollo basados en la anatomía: cambios en el número de estratos de la pared y su relación con las etapas del desarrollo del grano de polen. De manera preliminar se realizaron 14 muestreos de bulbos de *T. pavonia*, cada 5-8 días, de junio a agosto (estación de lluvias) desde la formación de la yema de la inflorescencia hasta la dehiscencia de la antera y liberación de los granos de polen. El muestreo significó el sacrificio del bulbo completo, el cual contiene una sola yema de inflorescencia con varios (2-5) primordios florales de los cuales se seleccionó el más desarrollado. En cada fecha de muestreo, la morfología de la planta se fotografió y relacionó con cada una de las etapas de desarrollo del grano de polen. Esta información fue útil debido a que, en una misma fecha, las poblaciones de *T. pavonia* presentaron individuos con diferentes estados de crecimiento y desarrollo (Fig. 1. A).

Microscopía de Luz. Primordios florales y sus anteras en diferentes etapas de desarrollo fueron disectados y fijados en solución FAA (10 % formalina, 5% ácido acético glacial, 50% etanol y 35% agua (Ruzin, 1999) por 24 h. Después de un lavado en agua se preservaron en solución GAA (glicerol al 25% v/v, alcohol al 50% v/v y agua 25% v/v). Las muestras se procesaron para su inclusión en parafina (Sass, 1958) con la ayuda de un cambiador automático de tejidos (Tissue Maraton, USA). Cortes (8-10 μm), transversales a la antera y seriados, obtenidos en un micrótomo rotatorio (American Optical, USA) fueron teñidos con safranina O y verde fijo (SVF), (Johansen,1940). Se realizaron tinciones específicas para polisacáridos insolubles, con ácido peryódico-reactivo de Schiff (APS) y para proteínas con azul negro de naftol (ANN) (Fisher,1968). La lignina se detectó con 2% floroglucinol en etanol 96% y HCl 50% (Sass,1958). La presencia de polenkit se determinó en aplastados de granos de polen en una gota de agua entre un portaobjetos y cubreobjetos, la presencia de gotas lipídicas se observó con un microscopio óptico (Pacini y Hesse, 2005). Los cortes fijos se observaron y fotografiaron en un fotomicroscopio Axioscop 2 Plus con una cámara Axiocam 5Rc (Carl Zeiss, Alemania).

Microscopía Electrónica de Barrido. Anteras maduras se fijaron en una solución de 3% glutaraldehído en amortiguador de fosfato Sorensen (pH 7.2, 0.1 M) por 24 h [24]. Los tejidos se lavaron dos veces en el amortiguador de fosfatos Sorensen y se deshidrataron en etanoles graduales (de 30%, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %, 100 %, 100 %) durante 45 min en cada cambio y luego se desecaron, en una desecadora de punto crítico modelo Samdri 795

(Tousimis, Maryland U.S.A.). Las muestras desecadas se montaron en porta muestras de latón con cinta de cobre doble adhesiva y se recubrieron con oro-paladio (80-20) en una ionizadora de metales Fine Ion Sputter (JFC-1100, JEOL, Japón). Los tejidos se observaron en un microscopio electrónico de barrido (JSM 6390, JEOL Japón) operado a 15 kV.

Resultados y discusión

El muestreo de las etapas tempranas y la reconstrucción de los eventos involucrados en la ontogenia y desarrollo de las partes reproductivas de *T. pavonia* resultó complejo porque las primeras etapas del desarrollo del primordio de inflorescencia ocurren dentro del bulbo subterráneo (Fig. 1. A - D) y no contamos con información previa sobre indicadores morfológicos externos para guiar la recolecta en campo. En *T. pavonia* se encontró desarrollo asincrónico incluso entre anteras de una misma flor. En este estudio el desarrollo de la antera se dividió en 7 etapas con base en cambios significativos observados en la formación del grano de polen y su relación con el desarrollo de la pared de la antera.

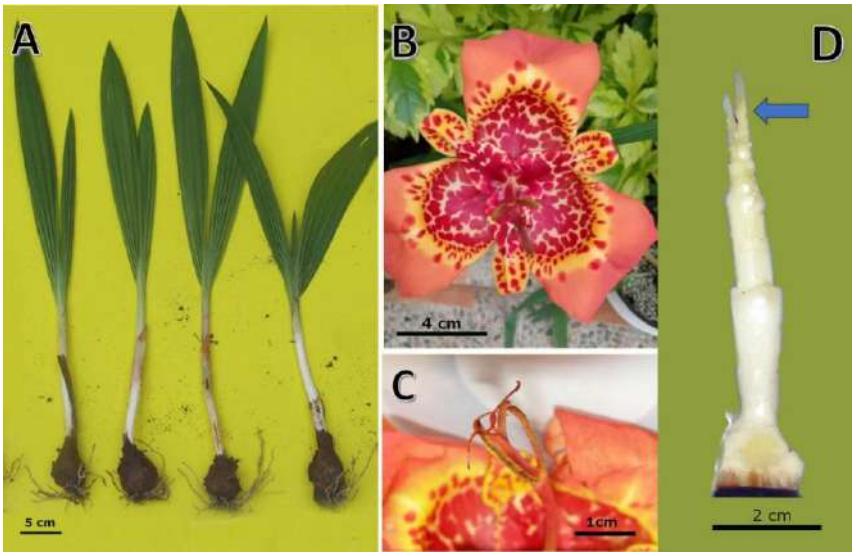


Figura 1. Plantas de *Tigridia pavonia* en estadío de yema floral. A, Plantas jóvenes con 2-3 nomófilos, con yemas florales jóvenes dentro del bulbo enterrado bajo el suelo (Etapa 0 y 1); B, Flor en antesis con tépalos moteados; C, Estambres monadelfos con anteras aplanadas grandes (1.5 cm), basifijas, extrorsas, con dehiscencia longitudinal y polen expuesto; D,

Meristemo de inflorescencia (flecha azul) y tallo en forma de disco (di) sus catáfilos fueron removidos.

Etapa 0. (5 y 14 de junio). La antera tiene cuatro lóbulos no prominentes formados por células meristemáticas con alta actividad mitótica. Al centro se observó tejido esporógeno (Fig. 2 A). Las células de la protodermis presentaron divisiones anticlinales, y debajo de estas hay células parietales primarias (pp) que presentaron divisiones periclinales, las cuales darán origen a endotecio y a los estratos intermedios (Fig. 3 A y 4 A). Estudios con microscopía confocal en maíz (*Zea mays*) demostraron que, en vista longitudinal de un lóbulo de la antera, hay formación simultánea de una columna central de células esporógenas, desde la punta hasta la base del lóbulo, mientras que las divisiones periclinales de las células parietales es estocástica (Kelliher et al., 2014) esto explica la dificultad de dar seguimiento puntual a este tipo de divisiones.

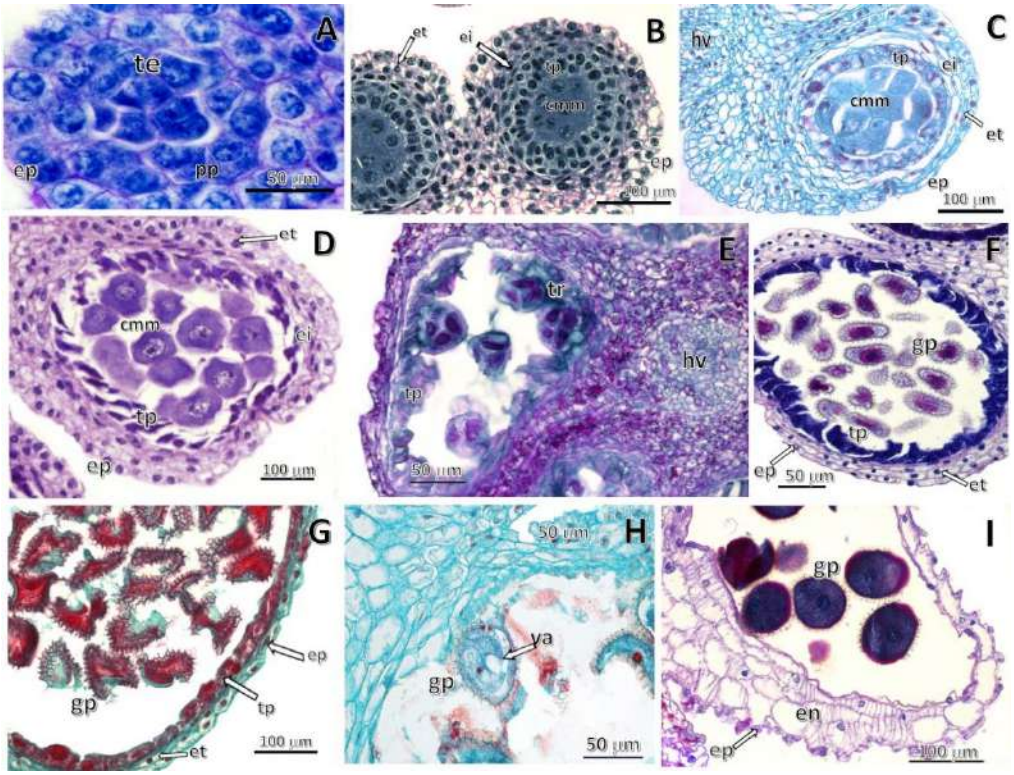


Figura 2. Desarrollo del grano de polen de *T. pavonia*. A, Etapa 0, tejido esporógeno y células parietales primarias; B. Etapa 1, inicia la formación de las células madre de microsporas CMM; C. Etapa 2, maduración de las CMM; D. Etapa 3, meiosis I de los microsporocitos; E. Etapa 4, meiosis II y formación de tétradas tetraédricas y decusadas; F. Etapa 5, separación de las microsporas libres mononucleadas sin calosa (1n); G. Etapa 5, inicio del colapso del tapete; H. Etapa 6, Microsporas vacuoladas; I, Etapa 6 avanzada, engrosamiento de la pared del endotecio, grano de polen con exina e intina. cm, células madre de las microesporas; ep, protodermis o epidermis; ei, estratos intermedios; gp, granos de polen joven; hv, haz vascular, pp, células parietales primarias, tp, tapete; tr, tétradas; v, vacuola.

Etapa 1 (14 y 20 de junio). Inicia la diferenciación de las células madre de microsporas (2n), las cuales se caracterizaron por su mayor tamaño, forma, paredes delgadas, citoplasma denso y núcleos prominentes (Fig. 2. B). En esta etapa ya existe una diferenciación de los estratos de la pared de la antera. De acuerdo con observaciones en la Etapa 0, las divisiones observadas en las parietales primarias (externas) estas dan origen a endotecio y los estratos intermedios (3-4) y las parietales secundarias internas (ps) desarrollarán el tapete (Fig. 4 A, B). Este tipo de desarrollo es similar al de las monocotiledóneas, pero nos inclinamos por no definir el tipo de desarrollo de la pared de la antera por las complejidades técnicas ya anotadas (Nadot et al., 2006). Hace falta revisar etapas intermedias, con muestreos con intervalos en horas para afirmar el tipo de desarrollo monocotiledóneo en esta especie. En el género *Iris*, el desarrollo de la pared de la antera se reportó como tipo dicotiledóneo (Fan, 2019). Un muestreo en intervalo de horas aportaría datos relevantes para su caracterización.

Etapa 2 (21 y 25 de junio). Ocurre un notable aumento del número y volumen en las células madre de microsporas (CMM), que han desarrollado una vacuola notoria. En el tejido conectivo, el haz vascular no está diferenciado y se presenta como procámbium (Fig. 2 C). Los estratos de la pared de la antera se han diferenciado en epidermis, un estrato subepidérmico que dará origen al endotecio, 2-3 estratos intermedios, algunos con vacuolas grandes, y un estrato interno, el tapete contiene numerosas vacuolas pequeñas y citoplasma denso (Fig. 4 C). Al final de esta etapa las células del tapete se alargan en sentido radial.

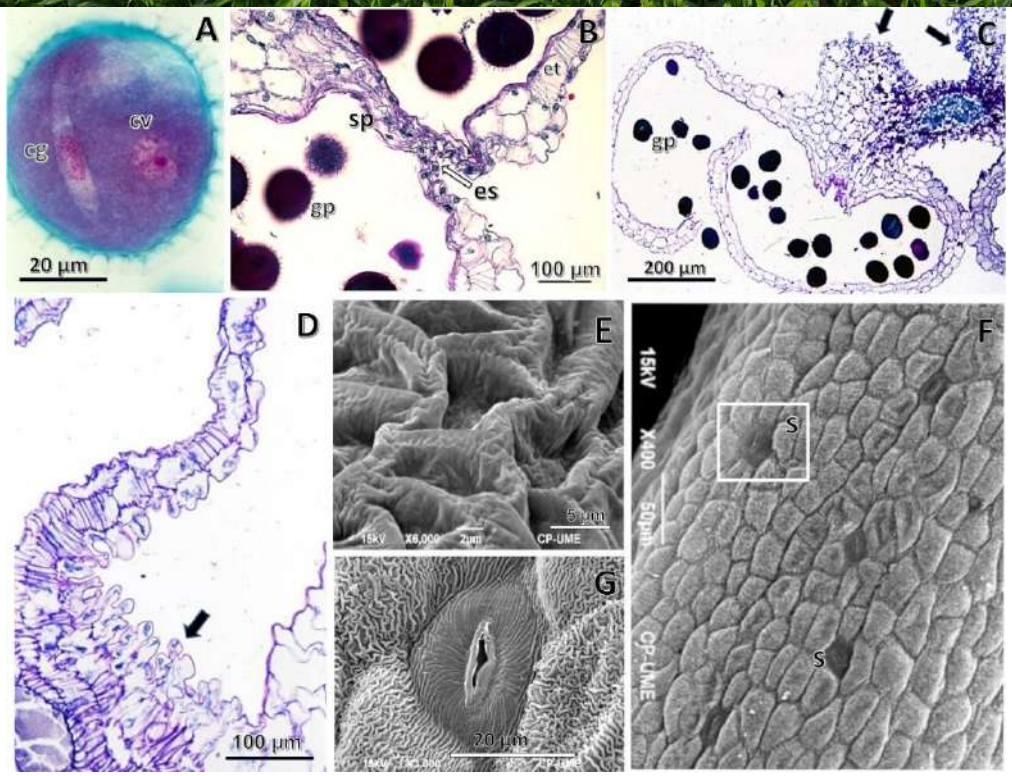


Figura 3. Antera y grano de polen maduro (Etapa 7). A; grano de polen bicelular, B; colapso de septo y estomio; C, rompimiento del septo y estomio; D, protuberancias en las células epidérmicas de las costillas dorsales del conectivo indicadas por flechas; E, MEB de las protuberancias epidérmicas del conectivo; F, pared de la antera con estomas anomocíticos, sin células acompañantes; G, detalle de las estomas de la pared de la entera, muestra la textura reticulada de la cutícula. de las tecas. cg, célula generatríz; cv, célula vegetativa, es, estomio; ep, epidermis; et, endotecio; gp, granos de polen; s, estoma; st, estomio; sp, septo. Flechas negras muestran las protuberancias de la epidermis del conectivo.

Etapa 3 (27 de junio y 8 de julio). La inflorescencia joven (25 mm de longitud), está aún dentro del bulbo subterráneo. Sucede la meiosis I en las células madre de microsporas (Fig. 2. D). En *Crocus* spp. (Rudall et al., 1984) y en *Hymenocallis caribaea* (Raymúndez et al., 2008) también se encontró que la meiosis de los microsporocitos ocurre cuando la inflorescencia joven se encuentra aún dentro de los bulbos subterráneos. En corte transversal

los lóbulos adaxiales de la antera fueron más grandes que los abaxiales. En esta etapa las células epidérmicas tienen paredes tangenciales externas ligeramente convexas y anticlinales en zig-zag; los estratos intermedios aumentaron a 3-4 hileras, por divisiones periclinales y la capa intermedia adosada al tapete presenta paredes delgadas con vacuolas grandes. Hay un estrato de tapete con numerosas vacuolas y citoplasma denso (Fig. 4 D). En *Allium sativum* (clon Piemonte) también se reportó vacuolización de las células del tapete en esta misma etapa de desarrollo (Gori, 1982).

Etapa 4 (15 y 20 de julio). En este periodo ocurre la meiosis II de las CMM. La inflorescencia ha emergido del suelo y mide de 15-30 cm (dependiendo de la altura de la planta) pero ésta no es visible porque la cubren las vainas de hipsófilos caulinares o brácteas. Se forman las tétradas cubiertas de calosa y numerosos granos de almidón rosados cerca del núcleo (APS). Se detectaron dos tipos de tétradas, tetraédricas e isobilaterales, en un mismo lóculo de la antera (Fig. 2. E). Se sugiere citocinesis simultánea, ya que no observamos la diada en ninguna de las muestras revisadas; al respecto se indica que esto puede deberse a la dirección de la formación de paredes durante la citocinesis (De Storme y Geelen, 2003). Existen evidencias de que en las monocotiledóneas es común la citocinesis sucesiva, la cual da lugar a un mayor número de tipos de tétradas (tetragonales, isobilaterales, romboidales, lineares, decusadas, con forma "T"); pero también ocurre la citocinesis simultánea que forma tétradas tetraédricas y decusadas, y un tipo intermedio que forma tétradas irregulares debidas a la orientación del huso acromático durante la meiosis II (Skvarla, y Larson,1963). Las células del tejido conectivo y de las paredes de la antera presentan numerosos granos de almidón (APS). En la pared de la antera, dos estratos intermedios se aplastan, las células del estrato más cercano al tapete tienen paredes muy delgadas y vacuolas más grandes que en la etapa anterior (Fig. 4 D). En el tapete hay células que se alargan en sentido tangencial y otras en sentido radial y forman protuberancias que invaden el lóculo, y en algunas regiones las protuberancias abrazan las tétradas de microsporas (Fig. 4 D). Cambios similares se observaron en el tapete secretor de *Crocus sativus* (Chichiricco, 1989) en *Aloe jucunda* y en *Aloe lateritia* en esta misma etapa (Furness y Rudall, 1998). Es posible que el tapete de *T. pavonia* tenga un tipo desarrollo intermedio, entre secretor y periplasmodial, esto debido al cambio de forma que experimentan sus células (Shamrov. 2021). Hacia el final de esta etapa, la calosa de las tétradas inicia su degradación.

Etapa 5 (21 de julio y 30 de julio). La calosa que rodea a las tétradas se ha degradado totalmente y las microsporas monocelulares (1n) se separan, la formación del grano de polen joven inicia. Se forma la exina la cual tiño de azul con ANN, reacción asociada a proteínas.

Cerca del núcleo se visualizaron numerosos granos de almidón, de color rosado por la tinción de polisacáridos insolubles (APS) (Fig. 2 D). Las células epidérmicas de la pared de la antera se ondulan y alargan en sentido periclinal, excepto las más cercanas a la región del conectivo, el endotecio es vacuolado y los estratos intermedios ya no son claramente distinguibles. Las células del tapete presentan características propias del proceso de muerte celular programada, sus células tienen formas más irregulares que en la etapa anterior y su citoplasma se observa fuertemente teñido de azul con APS-ANN (Fig. 2 F) y de rojo con SVF (Fig. 2 G).

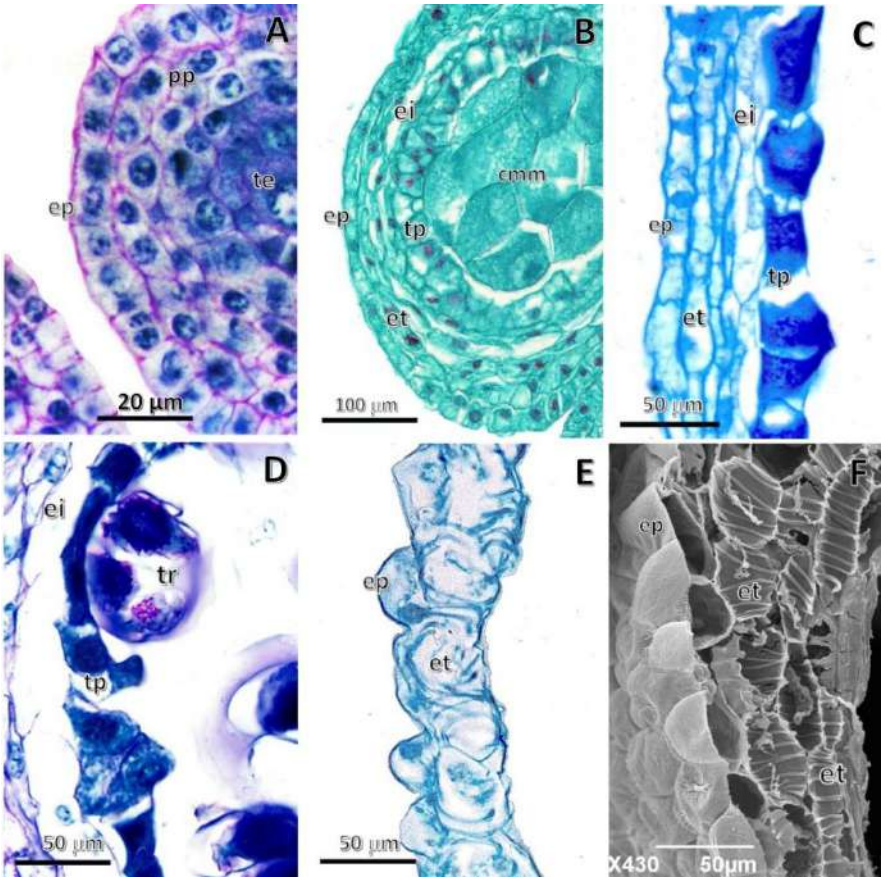


Figura 4. Desarrollo de la pared de la antera de *T. pavonia*. A, Etapa 0, Tejido esporógeno y células parietales primarias con divisiones periclinales; B, Etapa 1 y 2, diferenciación del endotecio, estratos intermedios y tapete, C, Etapa 3 tapete maduro y colapso parcial de los estratos intermedios; D, Etapa 4 y 5, estratos intermedios vacuolados, tapete con extensiones hacia las tétradas; E, Etapa 6, estratos intermedios y tapete colapsado, inicia el engrosamiento

del endotecio; F, Etapa 7, MEB de pared de la antera madura con engrosamientos helicoidales y reticulados hacia el conectivo con varios estratos. ep, epidermis; ei, estratos intermedios; et, endotecio; pp, células parietales primarias; tp, tapete; tr, tétrada tetraédrica.

Etapa 6 (31 de julio y 14 de agosto). Las microsporas forman vacuolas pequeñas que luego coleasen para formar una vacuola central de gran tamaño (Fig. 2. H). Se ha sugerido que la función de estas grandes vacuolas es el establecimiento de la polaridad para el acomodo espacial del núcleo, como ocurre en *Zea mays*, o de microtúbulos y microfilamentos, eventos previos a la mitosis (Bedinger,1992) que resultan en la formación de dos células hijas asimétricas, la célula vegetativa y la generatriz. En esta etapa ya no hay granos de polen visibles alrededor del núcleo de las microsporas, fenómeno contrario a lo encontrado en maíz (Bedinger,1992). Los de 6-7 estratos intermedios se reducen a 2 estratos en la región del estomio y se colapsan parcialmente pero aún no se separan (Fig. 3. B). El tapete está totalmente desintegrado, las células epidérmicas son tabloides y el endotecio ha desarrollado engrosamientos lignocelulósicos que también se observan en las células cercanas al conectivo (Figs. 3 D y 4 E). Se ha descubierto que la presencia de lignina en estos engrosamientos es indispensable para que ocurra la dehiscencia de las anteras (Wilson, et al.,2011; Hao, et al., 2014).

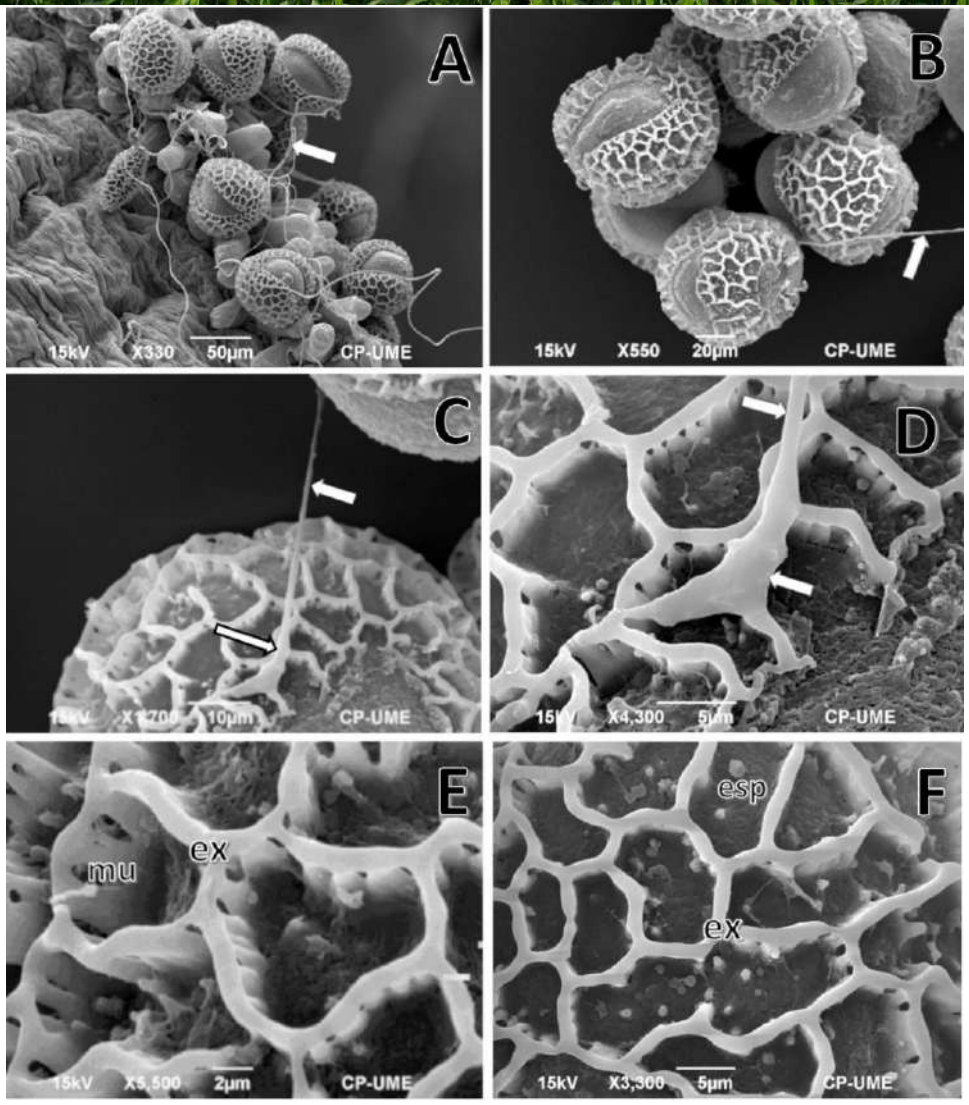


Figura 5. Estructura del polen maduro con MEB (Etapa 7): A, granos de polen con hilos de viscina; B, granos de polen monocolpados con hilo de viscina; C, grano de polen con un hilo de viscina emergiendo de la exina; D, detalle de la emergencia del hilo de viscina de la exina; E, ornamentación de la exina que muestra muros discontinuos; F, exina con espículas basales

en forma de gránulos; esp, espículas; ex, exina; mu, muri; Flechas blancas indican los hilos de viscina.

Etapa 7 (15 y 21 de agosto). En las microsporas monocelulares, ocurre una mitosis asimétrica que caracteriza el inicio de la microgametogénesis. Cada microspora forma una célula vegetativa grande, con núcleo notorio y citoplasma granuloso, y una célula generatriz pequeña con forma de huso, de pared muy delgada y núcleo notorio (Fig. 3 A). Esta división marca el fin del desarrollo de la microspora (1n) y el inicio del desarrollo del grano de polen joven que después de que se forma el tubo polínico a partir de la célula vegetativa (1n), la célula generatriz se volverá a dividir por mitosis (mitosis II) y formará dos células espermáticas, de ploidía 1n cada una. Esta secuencia de desarrollo ha sido descrita por varios autores (Berger y Twell, 2011; Hafidh et al., 2016; Astrand et al., 2021). En *T. pavonia* tiene lugar una dehiscencia parcial de las anteras uno o dos días antes de la apertura del botón floral debido al colapso y rompimiento de los septos y el estomio (Fig. 3 C). En las anteras de maíz (*Zea mays*), un fenómeno similar fue observado, cuya causa se atribuyó al aumento de CO2 en la antera por la respiración de los granos de polen (Keijzer et al.,1996). En *Crocus* el estomio se rompe antes de la abertura completa de la flor (Furness y Rudall,1998). En *Zea mays* la dehiscencia sucede por lisis enzimática de los septos, se forma una sola cavidad por teca, y posterior deshidratación del estomio (Bedinger, 1992), en *T. pavonia* las células del estomio y las células de los septos se rompen en un solo evento de manera sincrónica para la liberación de los granos de polen bicelulares antes de la abertura floral (Fig. 3 C). En la pared de la antera estudiada con MEB, fueron encontrados estomas pequeños sin células acompañantes del tipo anomocíticos, algunos cerrados y otros abiertos (Fig. 4.F), (Fig. 4. G). Eames (1961) señala que los estomas presentes en las paredes de los esporangios son raros, y dudosamente funcionales. *T. pavonia* tiene una columna estaminal formada por tres estambres con anteras grandes (1.5 cm) aplanadas, basifijas, extrorsas, con dehiscencia longitudinal. Hay una costilla dorsal a cada lado del conectivo (Fig. 3. C). Las células de la epidermis de estas costillas desarrollan paredes anticlinales muy elevadas (Fig. 4 E y F). El endotecio monoestratificado, con engrosamientos retículo-helicoidales y lignocelulósicos (Fig. 3. C), forma 3-4 estratos cerca del conectivo aquí también se observaron células grandes con taninos (Fig. 3. D), (Fig. 4. D).

Estos engrosamientos se asocian con resistencia a tensiones durante la expansión celular en anteras grandes, con granos de polen grandes (Keijzer, 1987). Por su posición, es muy probable que esta región también contribuya a la abertura de la antera. Santiago-Mejía (2018) encontró que los granos de almidón, como materia de reserva energética, tienen una función

importante en el desarrollo de óvulos y polen en *Prunus pérsica*. En *T. pavonia* se observaron granos de almidón durante el desarrollo de la antera y su abundancia estuvo concentrada en el tejido conectivo y en la epidermis de los lóculos. Se han propuesto varias rutas metabólicas para estos granos de almidón: división de plastidios, translocación de carbohidratos para desarrollo de la antera, y microsporas (Pacini, 2000). Los granos de polen de *T. pavonia* son bisulcados con membrana de la abertura o intina psilada, exhiben pared con exina intectada reticulada, heterobrocada y curvimurada. Los pili (báculas) fusionados forman columnas de diferente grosor y las espículas o gránulos están dispuestos en la base del lumen o nexina (Fig. 5 E y F).

La condición bisulcada es característica de la subtribu Tigridiinae y se interpreta como un carácter derivado (sinapomorfia) ya que el polen monosulcado es el tipo más común, y se considera ancestral para las monocotiledóneas y en general para angiospermas Goldblatt y Thomas (1992). Rudall y Wheeler (1988) encontraron que en *T. pavonia* son muy grandes (72.2-) 89.0 (-104.2) µm X (59.4-) 69.4 (-77.3) µm, comparados con el resto de las especies del mismo género, y pueden ser elípticos o esferoidales en vista polar, y monosulcados o bisulcados. Molseed (1970) detectó presencia de hilos de viscina en granos de polen de *T. pavonia* pero no documentó su hallazgo, en contraste Rudall y Wheeler (1988) no reportaron esta estructura en material herborizado, posiblemente por estar seco. Nuestras observaciones con MEB en granos de polen obtenidos de plantas frescas de *T. pavonia*, evidenciaron la presencia de hilos tipo viscina, que emergen de la exina (Fig. 5. B y C). Con MEB pudo documentarse un detalle del origen del hilo de viscina desde una columna de la exina (Fig. 5 D), que de acuerdo con la literatura se sugiere que son de esporopolenina (Hesse,1981). La presencia de polenkit, fue corroborada por la observación de gotas lipídicas en el aplastado de granos de polen fresco, en una gota de agua. Estas dos estructuras (hilos de viscina y polenkit) del grano de polen de *T. pavonia* aseguran su adherencia al cuerpo de polinizadores y su permanencia sobre el estigma (Fig. 5 A).

Conclusiones

El desarrollo temprano del grano de polen de *T. pavonia*, desde las células madre de microsporas (CMM) hasta la formación de las tétradas de microsporas, sucede dentro del bulbo subterráneo. En esta especie se forman dos tipos de tétradas, tetraédricas e isobilaterales por citocinesis sucesiva. El tapete es del tipo secretor con extensiones hacia las tétradas por lo que se le podría considerar un tipo intermedio secretor-ameboide. Los engrosamientos del endotecio son lignocelulósicos helicoidales que en algunas regiones se anastomosan por lo que podrían denominarse retículo-helicoidales. La dehiscencia parcial de

la antera sucede antes de abertura total de la flor. En *T. pavonia* ocurre colapso y degradación de los septos y del estomio de manera sincrónica. El estudio con MEB documenta por primera vez, en el género *Tigridia* y la familia Iridaceae, la presencia de hilos de viscina que se originan de la exina. En estudios estructurales de biología reproductiva de plantas, la ML y MEB son herramientas esenciales y complementarias. Este trabajo es una contribución original que aporta información nueva sobre las estructuras reproductivas masculinas, para la tribu Tigridieae y *T. pavonia*.

Literatura citada

Libros

Calderón de Rzedowski, G., & Rzedowski, J. (1990). Iridaceae. En J. Rzedowski & G. Calderón de Rzedowski (Eds.), *Flora fanerogámica del Valle de México* (Vol. 3, pp. 323–340). Instituto de Ecología, A.C.

Davis, G. L. (1966). *Systematic embryology of angiosperms*. Wiley.

Johri, B. M., Ambegaokar, K. B., & Srivastava, P. S. (1992). *Comparative embryology of angiosperms* (Vol. 2, pp. 885–886). Springer-Verlag.

Johansen, D. A. (1940). *Plant microtechnique*. McGraw-Hill.

Molseed, E. (1970). *The genus Tigridia (Iridaceae) of Mexico and Central America* (University of California Publications in Botany, Vol. 54). University of California Press.

Ruzin, S. E. (1999). *Plant microtechnique and microscopy*. Oxford University Press.

Sass, J. E. (1958). *Botanical microtechnique* (3rd ed.). Iowa State University Press.

Shivanna, K. R. (2003). *Pollen biology and biotechnology*. Science Publishers.

Revistas

Åstrand, J., Knight, C., Robson, J., Tallé, B., & Wilson, Z. A. (2021). Evolution and diversity of the angiosperm anther: *Trends in function and development. Plant Reproduction, 34*, 307–319. https://doi.org/10.1007/s00497-021-00416-1

Bedinger, P. (1992). The remarkable biology of pollen. *The Plant Cell, 4*, 879–887.

Berger, F., & Twell, D. (2011). Germline specification and function in plants. *Annual Review of Plant Biology, 62*, 461–484.

Chichiriccó, G. (1989). Embryology of *Crocus thomasii* (Iridaceae). *Plant Systematics and Evolution, 168*, 39–47.

Chichiricco, G. (1989). Microsporogenesis and pollen development in *Crocus sativus* L. *Caryologia, 42*(3–4), 249–257.

Cuevas-García, E. (2009). La esterilidad masculina en plantas, una perspectiva. *Biológicas, 11*, 79–86.

De Storme, N., & Geelen, D. (2013). Cytokinesis in plant male meiosis. *Plant Signaling & Behavior, 8*(3), e23394. https://doi.org/10.4161/psb.23394

Fan, L., Hasenstein, K. H., & Wang, L. (2019). Embryology of *Iris sanguinea* Donn ex Horn. and its systematic relationship. *Journal of Forestry Research, 30*(6), 2007–2020.

Fernández Gómez, J., Talle, B., & Wilson, Z. A. (2015). Anther and pollen development: A conserved developmental pathway. *Journal of Integrative Plant Biology, 57*(11), 876–891. https://doi.org/10.1111/jipb.12425

Fernández-Gómez, J., Tallé, B., & Wilson, Z. A. (2020). Increased expression of the MALE STERILITY1 transcription factor gene results in temperature-sensitive male sterility in barley. *Journal of Experimental Botany, 71*(20), 6328–6339. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa382

Fisher, D. B. (1968). Protein staining of ribboned epon sections for light microscopy. *Histochemie, 16*, 92–96.

Furness, C. A., & Rudall, P. J. (1998). The tapetum and systematics in monocotyledons. *The Botanical Review, 64*(3), 201–239.

Goldblatt, P. (1990). Phylogeny and classification of Iridaceae. *Annals of the Missouri Botanical Garden, 77*, 607–627.

Goldblatt, P., & Le Thomas, A. (1992). Pollen apertures, exine sculpturing and phylogeny in Iridaceae subfamily Iridoideae. *Review of Palaeobotany and Palynology, 75*(3–4), 301–315. https://doi.org/10.1016/0034-6667(92)90022-9

Goldblatt, P., Rodríguez, A., Powell, M. P., Davies, T. J., Manning, J. C., van der Bank, M., & Savolainen, V. (2008). Iridaceae "Out of Australasia"? Phylogeny, biogeography, and divergence time based on plastid DNA sequences. *Systematic Botany, 33*(3), 495–508.

Gori, P. (1982). Accumulation of polysaccharides in the anther cavity of *Allium sativum*, clone Piemonte. *Journal of Ultrastructure Research, 81*(2), 158–162.

Gupta, S. C., & Nanda, K. (1973). Fibrous endothecium, tapetum, and pollen development in *Belamcanda chinensis* DC. *Botanical Gazette, 134*(2), 125–129.

Hafidh, S., Fila, J., & Honys, D. (2016). Male gametophyte development and function in angiosperms: A general concept. *Plant Reproduction, 29*, 31–51. https://doi.org/10.1007/s00497-015-0272-4

Hao, Z., Avci, U., Tan, L., Zhu, X., Pattathil, S., Glushka, J., Eberhard, S., Sholes, T., Rothstein, G. E., Lukowitz, W., Orlando, R., Hahn, M. G., & Mohnen, D. (2014). Loss of *Arabidopsis* GAUT12/IRX8 causes anther indehiscence and leads to reduced G lignin associated with altered matrix polysaccharide deposition. *Frontiers in Plant Science, 5*, Article 357. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00357

Hesse, M. (1981). Pollenkitt and viscin threads: Their role in cementing pollen grains. *Grana, 20*, 145–152.

Keijzer, C. J. (1987). The processes of anther dehiscence and pollen dispersal. II. The formation and transfer mechanism of pollenkitt, cell wall development of the loculus tissues and the function of orbicules in pollen dispersal. *New Phytologist, 105*(3), 499–507. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1987.tb00887.x

Keijzer, C. J., Leferink-ten Klooster, H. B., & Reinders, M. C. (1996). The mechanics of the grass flower: Anther dehiscence and pollen shedding in maize. *Annals of Botany, 78*, 15–21.

Kelliher, T., Egger, R. L., Zhang, H., & Walbot, V. (2014). Unresolved issues in pre-meiotic anther development. *Frontiers in Plant Science, 5*, 347. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00347

Lakshmanan, K. K., & Philip, V. J. (1971). A contribution to the embryology of Iridaceae. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences, Section B, 73*, 110–116. https://doi.org/10.1007/BF03045310

Manning, J. C., & Goldblatt, P. (1990). Endothecium in Iridaceae and its systematic implications. *American Journal of Botany, 77*(4), 527–532. https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1990.tb13584.x

Munguía-Lino, G., Vargas-Amado, G., Vázquez-García, L. M., & Rodríguez, A. (2015). Riqueza y distribución geográfica de la tribu Tigridieae. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *86*, 80–98.

Nadot, S., Penet, L., Dreyer, L. D., Forchioni, A., & Ressayre, A. (2006). Aperture pattern and microsporogenesis in Asparagales. *Aliso: A Journal of Systematic and Floristic Botany*, *22*(1), 197–203. https://doi.org/10.5642/aliso.20062201.16

Pacini, E. (2000). From anther and pollen ripening to pollen presentation. *Plant Systematics and Evolution*, *222*, 19–43.

Pacini, E., & Hesse, M. (2005). Pollenkitt: Its composition, forms and functions. Flora – Morphology, Distribution, *Functional Ecology of Plants*, *200*(5–6), 399–415.

Penet, L., Laurin, M., Gouyon, P. H., & Nadot, S. (2007). Constraints and selection: Insights from microsporogenesis in Asparagales. *Evolution & Development*, *9*, 460–471. https://doi.org/10.1111/j.1525-142X.2007.00183.x

Penet, L., Nadot, S., Ressayre, A., Forchioni, A., Dreyer, L., & Gouyon, P. H. (2005). Multiple developmental pathways leading to a single morph: Monosulcate pollen (examples from the Asparagales). *Annals of Botany*, *95*, 331–343. https://doi.org/10.1093/aob/mci030

Raymúndez, U. M., Escala, J. M., & Enrech, N. X. (2008). Microsporogénesis en *Hymenocallis caribaea* (L.) Herb. (Amaryllidaceae). *Acta Botanica Venezuelica*, *31*(2), 409–424.

Rudall, P. J., Owens, S. J., & Kenton, A. Y. (1984). Embryology and breeding systems in *Crocus* (Iridaceae): A study in causes of chromosome variation. *Plant Systematics and Evolution*, *148*, 119–134.

Rudall, P., & Wheeler, A. (1988). Pollen morphology in Tigridieae (Iridaceae). *Kew Bulletin*, *43*(4), 693–701.

Santiago-Mejía, H., Zavaleta-Mancera, H. A., Cortés-Flores, J. I., Turrent-Fernández, A., & Albino-Garduño, R. (2018). Vascularization and starch grains during the morphogenesis of peach floral buds on different flowering dates. *Agrociencia*, *52*, 1121–1135.

Shamrov, I. I., Anisimova, G. M., & Babro, A. A. (2021). Tapetum types and forms in angiosperms. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences. Section B. Natural, Exact, and Applied Sciences*, *75*(3), 167–179. https://doi.org/10.2478/prolas-2021-0026

Skvarla, J. J., & Larson, D. A. (1963). Nature of cohesion within pollen tetrads of *Typha latifolia*. *Science, 140*, 173–175.

Vázquez-García, L. M., Przybyla, A. A., de la Cruz Torres, E., Navarro, H., & Torres Rodríguez, G. (2001). Morphological description of nine botanical varieties of *Tigridia pavonia* (L.f.) Ker Gawl. *Journal of Applied Botany*, *75*(1–2), 14–19.

Wilson, Z. A., Song, J., Taylor, B., & Yang, C. (2011). The final split: The regulation of anther dehiscence. *Journal of Experimental Botany*, *62*(5), 1633–1649.

Zhang, D., Wang, L., & Zhuo, L. (2011). Embryology of *Iris mandshurica* Maxim. (Iridaceae) and its systematic relationships. *Plant Systematics and Evolution*, *293*, 43–52.

Referencias electrónicas

Comisión Nacional del Agua. (s. f.). Normales climatológicas. Servicio Meteorológico Nacional. https://smn.conagua.gob.mx/tools/RESOURCES/Normales_Climatologicas/Normales6190/mex/nor6190_15101.txt [27 de julio de 2026]

Eames, A. J. (1961). *The morphology of angiosperms*. McGraw-Hill.

https://archive.org/details/morphologyofangi00eame [27 de julio de 2026]

Diversidad genética de chía (*Salvia hispanica* L.) de accesiones silvestres y cultivadas por medio de marcadores silicoDArT

Dalila Mérida-Hernández[53], Alma Aurelia Ramos-García, Sabina Irene Lara-Cabrera, Martha Hernández-Rodríguez[54]

Resumen

La chía (*Salvia hispanica* L.) es un recurso agrícola cuya diversidad genética es fundamental para su conservación y aprovechamiento. El objetivo de este estudio fue caracterizar la diversidad genética de accesiones silvestres y cultivadas mediante marcadores SilicoDArT. Se analizaron 22 accesiones: nueve silvestres, recolectadas en diferentes estados de México, y 13 cultivadas, procedentes de Puebla, México. El ADN genómico se extrajo mediante el método CTAB y las muestras se genotipificaron con la tecnología DArTseq. Se obtuvieron 65,429 marcadores SilicoDArT, de los cuales se conservaron 53,828 después de retirar aquellos con datos faltantes. La diversidad genética se estimó por locus y accesión. Además, se realizó un análisis molecular de varianza (AMOVA), un agrupamiento basado en la distancia genética de Rogers y un escalamiento multidimensional (MDS) mediante BIO-R v3.3. A nivel de locus, se detectó 12.13 % de loci polimórficos, con He = 0.219, Ae = 1.307 e índice de Shannon = 0.5341. Las accesiones silvestres presentaron mayores valores promedio de He (0.3389), Ae (1.5423) y rareza (255.41) que las cultivadas (0.1743, 1.2132 y 91.54, respectivamente). El AMOVA mostró 31.24 % de variación entre grupos y 68.75 % dentro de ellos. El agrupamiento y el MDS diferenciaron consistentemente dos grupos. Los resultados evidenciaron mayor variabilidad genética en los materiales silvestres, lo que destaca su importancia como reservorio de diversidad genética y la necesidad de promover su conservación y aprovechamiento.

Palabras clave: *Salvia hispanica*, diversidad, marcadores SilicoDArT, chía silvestre, chía cultivada.

Abstract

Chia (*Salvia hispanica* L.) is an agricultural resource whose genetic diversity is fundamental to its conservation and utilization. This study aimed to characterize the genetic diversity of

[53] Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco 56264, Estado de México, merida.dalila@colpos.mx; ramos.alma@colpos.mx; sabina.lara@umich.mx; *hernandez.martha@colpos.mx
[54] Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. [3]Colegio de Postgraduados Campus Puebla

wild and cultivated accessions using SilicoDArT markers. Twenty-two accessions were analyzed: nine wild accessions collected in different states of Mexico and 13 cultivated accessions from Puebla, Mexico Genomic DNA was extracted using the CTAB method, and the samples were genotyped with DArTseq technology. A total of 65,429 SilicoDArT markers were obtained, of which 53,828 were retained after markers with missing data were removed. Genetic diversity was estimated at the locus and accession levels. An analysis of molecular variance (AMOVA), cluster analysis based on Rogers' genetic distance, and multidimensional scaling (MDS) were also conducted using BIO-R v3.3. At the locus level, 12.13% of loci were polymorphic, with He = 0.219, Ae = 1.307, and a Shannon index of 0.5341. Wild accessions exhibited higher mean He (0.3389), Ae (1.5423), and rareness (255.41) values than cultivated accessions (0.1743, 1.2132, and 91.54, respectively). AMOVA showed that 31.24% of the variation occurred between groups and 68.75% within groups. Cluster analysis and MDS consistently differentiated the two groups. The results revealed greater genetic variability in the wild materials, highlighting their importance as a reservoir of genetic diversity and the need to promote their conservation and utilization.

Keywords: *Salvia hispanica*, diversity, SilicoDArT markers, wild chia, cultivated chia.

Introducción

La chía (*Salvia hispanica* L.) es una especie nativa de Mesoamérica, cultivada desde la época precolombina, que actualmente ha adquirido importancia debido al valor nutricional de sus semillas. La expansión de su cultivo ha incrementado el interés por conservar y caracterizar los recursos genéticos de la especie, particularmente sus poblaciones silvestres y las especies afines del género *Salvia*, las cuales pueden constituir fuentes de variación útiles para el mejoramiento genético (Lara-Cabrera et al., 2024).

La diversidad genética de *S. hispanica* se ha evaluado mediante diferentes tipos de marcadores moleculares. Cahill (2004) encontró mayor diversidad genética en accesiones silvestres que en materiales domesticados con marcadores RAPD, y sugirió una reducción de la variabilidad asociada con el proceso de domesticación. Posteriormente, estudios realizados con marcadores ISSR también revelaron bajos niveles de variabilidad genética entre accesiones de distintas procedencias, posiblemente relacionados con la autofecundación, la deriva genética y la selección humana (Palma-Rojas et al., 2017).

La comparación de materiales silvestres y cultivados mediante herramientas genómicas ha reforzado este patrón. Peláez et al. (2019), mediante el análisis de 23,641 SNP, encontraron que la mayor proporción de la variación genética se conservaba en las poblaciones silvestres,

mientras que las accesiones cultivadas mostraban un agrupamiento más estrecho. Por su parte, Hernández-Rodríguez et al. (2025), encontraron también que la mayor diversidad se encontró en el grupo de accesiones silvestres de una colección integral de chía evaluada con 26,138 marcadores SilicoDArT. Estos resultados resaltan el valor de los materiales silvestres como reservorios de diversidad genética para programas de conservación y mejoramiento.

Los marcadores SilicoDArT permiten analizar un número elevado de loci distribuidos en el genoma, por lo que constituyen una herramienta útil para caracterizar la variabilidad del germoplasma y evaluar la diferenciación genética entre grupos. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue caracterizar la diversidad genética de accesiones silvestres y cultivadas de *S. hispanica* mediante marcadores SilicoDArT.

Materiales y Métodos

Se analizaron 22 accesiones de chía, de las cuales 9 accesiones (g1s, g2s, g6s, g7s, g9s, g10s, g13s, g14s y g15s) fueron de origen silvestre, correspondientes a materiales recolectados en campo en diferentes estados de la República Mexicana, proporcionados por la Dra. Sabina Lara Cabrera de la Universidad Michoacana San Nicolás de Hidalgo. Para su conservación y transporte, se utilizaron hojas de un individuo, desecadas con perlas de gel de sílice con indicador de humedad de 3 mm de diámetro.

Las 13 accesiones restantes (gSH02, gSH06, gSH10, gSH13, gSH18, gSH20, gSH21, gSH23, gSH25, gSH26, gSH28, gSH29 y gSH30) fueron sembradas en Montecillo, Texcoco, México. Para cada accesión, se establecieron cinco individuos en condiciones de invernadero, de los cuales se recolectaron hojas jóvenes que se conservaron a -80 ºC hasta la extracción de ADN. Estas accesiones fueron proporcionadas por la M.C. Alma Aurelia Ramos García del Colegio de Postgraduados Campus Puebla, a partir de semillas obtenidas de productores de Puebla y evaluadas en el campo experimental San Martinito del INIFAP, Puebla, ubicado a una altitud de 2542 msnm.

La extracción de ADN genómico se realizó en el Laboratorio de Marcadores Moleculares del Colegio de Postgraduados campus Montecillo mediante una modificación del método basado en bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB) de Doyle y Doyle (1987). La modificación consistió en incorporar 10 mg de polivinilpirrolidona 40 (PVP40; Sigma-Aldrich) por cada 100 mg de tejido. Para las accesiones cultivadas se utilizaron 300 mg de tejido y para las silvestres, 100 mg.

Las muestras se colocaron en microtubos de polipropileno de 2 mL con la cantidad correspondiente de PVP40. El tejido se pulverizó inmediatamente con nitrógeno líquido mediante un pistilo de polipropileno. Posteriormente, se añadió 1 mL de solución de lisis precalentada a 65 °C, compuesta por Tris-HCl 150 mM, NaCl 1.4 M, EDTA disódico dihidratado 25 mM, CTAB 3.5 % y β-mercaptoetanol 1 % (Sigma-Aldrich). Las muestras se homogeneizaron e incubaron en baño María a 65 °C durante 60 min, con mezclado por inversión cada 15 min.

Después del lisado, se adicionaron 500 µL de cloroformo:alcohol isoamílico (24:1, JT Baker) mezclando por inversión a temperatura ambiente por 10 minutos. Posteriormente, se centrifugaron a 11,500 rpm durante 10 min a temperatura ambiente, después de esto se recolectó ~700 µL de la fase acuosa superior, y se transfirió a un microtubo nuevo de 1.5 mL donde se adicionaron 350 µL de isopropanol frío (JT Baker) para luego incubar durante 1 h a −20 °C para la precipitación de ADN. Trascurrido el tiempo de precipitación, se centrifugó a 11,500 rpm durante 10 min a temperatura ambiente y se descartó el sobrenadante, dejando únicamente la pastilla de ADN.

Para el lavado de la pastilla se adicionó 1 mL de etanol al 70 % y se centrifugó a 8,000 rpm durante 5 min. Después de eliminar el etanol, las muestras se dejaron secar durante aproximadamente 2 h a temperatura ambiente. La resuspensión de ADN se hizo con 200 µL de solución TE (Tris 10 mM, EDTA 1 mM, pH 8.0), incubando durante una noche a 4 °C para su disolución.

La concentración y pureza del ADN se determinaron mediante espectrofotometría utilizando un NanoDrop ND2000 (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA). La calidad de las muestras se evaluó considerando como referencia los valores de absorbancia: A260/A280 de 1.8 y A260/230 2.0 y 2.2, mientras que la integridad del ADN se verificó mediante electroforesis en gel de agarosa al 1 %, utilizando 2 µL de ADN y 3 µL de buffer de carga 5X por muestra.

Una vez que las muestras cumplieron con los criterios de concentración, pureza e integridad, los extractos individuales de ADN correspondientes a los cinco individuos de cada accesión cultivada se ajustaron a una misma concentración y posteriormente se combinaron para obtener una muestra compuesta de ADN por accesión. Las accesiones silvestres estuvieron representadas por el ADN de un solo individuo. De cada muestra compuesta de las accesiones cultivadas y de cada muestra individual de las accesiones silvestres se enviaron 100 µL de ADN, a una concentración final de 100 ng μL^{-1}, al Servicio de Análisis de Genotipificación

para la Agricultura del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), México.

De acuerdo con el informe del servicio, la reducción de la complejidad del genoma se realizó mediante digestión con las enzimas de restricción *PstI* (5′-CTGCA↓G-3′) y *NspI* (5′-R↓CATGY-3′), de acuerdo con el protocolo de Diversity Arrays Technology. Las bibliotecas se secuenciaron en una plataforma NovaSeq 6000 (Illumina, San Diego, California, EUA). Mediante esta tecnología se obtuvieron marcadores dominantes SilicoDArT, codificados en una matriz binaria como presencia (1) o ausencia (0).

La matriz de marcadores fue sometida a un proceso de depuración, donde se eliminaron los marcadores que presentaron datos faltantes entre las 22 accesiones. Posteriormente, los indicadores de la diversidad genética a nivel de loci y por accesión: proporción de loci polimórficos; heterocigosidad esperada (He); número efectivo de alelos (Ae); índice de diversidad de Shannon, y rareza (Ra), se estimaron mediante BIO-R v3.3 (Pacheco-Gil et al., 2016). Asimismo, se realizó un análisis molecular de varianza (AMOVA) para determinar la distribución de la variación genética dentro y entre los grupos silvestre y cultivado. Las relaciones genéticas entre las accesiones se examinaron mediante un análisis de agrupamiento basado en la distancia genética de Rogers y un análisis de escalamiento multidimensional (MDS).

Resultados y discusión

Se identificaron 65,429 marcadores SilicoDArT en el panel de 22 accesiones de chía. Después de eliminar los marcadores con datos faltantes, se conservaron 53,828 para los análisis de diversidad genética. A nivel de locus, 12.13 % de los loci fueron polimórficos. La He fue de 0.219 ± 0.00121, el Ae = 1.307 ± 0.00267 y el índice de Shannon de 0.5341 ± 0.00209. La Ho no se estimó debido a la naturaleza dominante de los marcadores SilicoDArT, que no permite distinguir entre individuos homocigotos dominantes y heterocigotos.

Los indicadores obtenidos mostraron la existencia de variación genética en el panel de accesiones evaluadas, aunque solamente 12.13 % de los loci fueron polimórficos. La baja proporción de loci polimórficos podría relacionarse con el sistema predominantemente autógamo de la especie y con los efectos de la domesticación y la selección. Cahill (2004), mediante marcadores RAPD, también encontró mayor diversidad genética en accesiones silvestres (HG = 0.15) que en materiales domesticados (HG = 0.10), y sugirió una pérdida de diversidad asociada a la domesticación.

A nivel de accesión, hubo diferencias entre los materiales silvestres y cultivados, las cuales son mostradas en el Cuadro 1. Las accesiones silvestres presentaron en promedio una He de 0.338, Ae de 1.542, y una Ra de 255.406. Por su parte las accesiones cultivadas mostraron valores de He de 0.174, Ae de1.213 y una Ra de 91.53; todos estos valores fueron menores a los de las chías silvestres.

Cuadro 1. Parámetros de diversidad a nivel accesión del panel de 22 genotipos de chía.

Accesión	He	Ae	Ra	Grupo
g10s	0.3131	1.4557	212.6857	1
g13s	0.3639	1.5721	256.5485	1
g14s	0.1763	1.2140	129.4398	1
g15s	0.2331	1.3040	161.9681	1
g1s	0.3192	1.4688	217.9487	1
g2s	0.4998	1.9994	498.5082	1
g6s	0.3950	1.6528	278.0678	1
g7s	0.4161	1.7126	310.2575	1
g9s	0.3340	1.5014	233.2335	1
gSH02p	0.2035	1.2555	105.4359	2
gSH06p	0.1726	1.2085	87.6514	2
gSH10p	0.1733	1.2096	87.6296	2
gSH13p	0.1703	1.2053	89.0572	2
gSH18p	0.1320	1.1520	83.1958	2
gSH20p	0.1179	1.1337	76.4270	2
gSH21p	0.1481	1.1738	83.5308	2
gSH23p	0.1966	1.2448	93.4552	2
gSH25p	0.1906	1.2355	93.7582	2
gSH26p	0.1377	1.1597	82.2210	2
gSH28p	0.2568	1.3455	128.9456	2
gSH29p	0.1923	1.2381	91.3418	2
gSH30p	0.1736	1.2100	87.3657	2

Entre las accesiones silvestres, g2s presentó los mayores valores de diversidad (He = 0.499; Ae = 1.999) y el mayor valor de Ra (498.508), mientras que g14s presentó los menores valores de diversidad dentro de este grupo (He = 0.176; Ae = 1.214; Ra = 129.439). En las accesiones cultivadas, gSH28p presentó los mayores valores de diversidad (He = 0.256; Ae

= 1.345; Ra = 128.94), mientras que gSH20p presentó los menores valores (He = 0.117; Ae = 1.133; Ra = 76.43).

Estos valores indican que la diversidad no se distribuyó de manera uniforme entre todas las accesiones, ya que los materiales silvestres tuvieron una variación genética más alta que los materiales cultivados, lo que coincide con lo descrito por Cahill (2004), quien reportó mayor diversidad en materiales silvestres que en variedades domesticadas. La posible explicación de esta diferencia entre estos dos grupos es el posible efecto de la domesticación y selección humana. Hernández-Gómez y Miranda-Colín (2008) señalan que la diversidad genética de la chía se ha reducido y que las poblaciones cultivadas presentan diferencias morfológicas importantes respecto a las silvestres, ya que la selección podría favorecer determinados genotipos y reducir alelos presentes originalmente en poblaciones silvestres.

El AMOVA mostró que 31.24 % de la variación genética se distribuyó entre los grupos silvestre y cultivado, mientras que 68.75 % se encontró dentro de ellos. La diferenciación entre grupos fue estadísticamente significativa ($\Phi = 0.3124$; $P = 0.0001$). Estos resultados indican que, aunque la mayor proporción de la variación se encuentra dentro de los grupos, existe una diferenciación genética importante entre los materiales silvestres y cultivados. Este patrón concuerda con Calderón-Ruiz et al. (2021), quienes diferenciaron poblaciones silvestres, semidomesticadas y domesticadas mediante características asociadas con el grado de domesticación.

El dendrograma construido a partir de las distancias genéticas de Rogers separó las accesiones en dos grupos principales, correspondientes a los materiales silvestres y cultivados (Figura 1). La distancia genética promedio dentro del grupo silvestre fue de 0.5867, mientras que en el grupo cultivado fue de 0.2705. La mayor distancia observada entre las accesiones silvestres revela una mayor heterogeneidad genética, mientras que la menor distancia entre las cultivadas indica una mayor similitud dentro de este grupo.

El escalamiento multidimensional (MDS) en tres dimensiones representó visualmente la separación entre las accesiones silvestres (categoría 1) y cultivadas (categoría 2) observada en el dendrograma (Figura 2). La primera dimensión distinguió completamente ambos grupos. Las accesiones silvestres presentaron coordenadas negativas, desde −0.5138 para g2s hasta −0.0265 para g14s, mientras que todas las cultivadas mostraron coordenadas positivas, desde 0.0945 para gSH20p hasta 0.1628 para gSH28p.

En la segunda dimensión, las accesiones silvestres mostraron una amplitud mayor, con coordenadas de −0.2336 a 0.3132, mientras que las cultivadas se distribuyeron en un intervalo más estrecho, de −0.0687 a −0.0170. Un patrón similar se observó en la tercera dimensión: las accesiones silvestres presentaron coordenadas de −0.2684 a 0.2836 y las cultivadas de −0.0381 a −0.0039 (Cuadro 2). La mayor dispersión de las accesiones silvestres en las tres dimensiones es congruente con sus mayores valores de diversidad y distancia genética. En contraste, la proximidad entre las accesiones cultivadas indica una mayor similitud genética entre los materiales procedentes de Puebla.

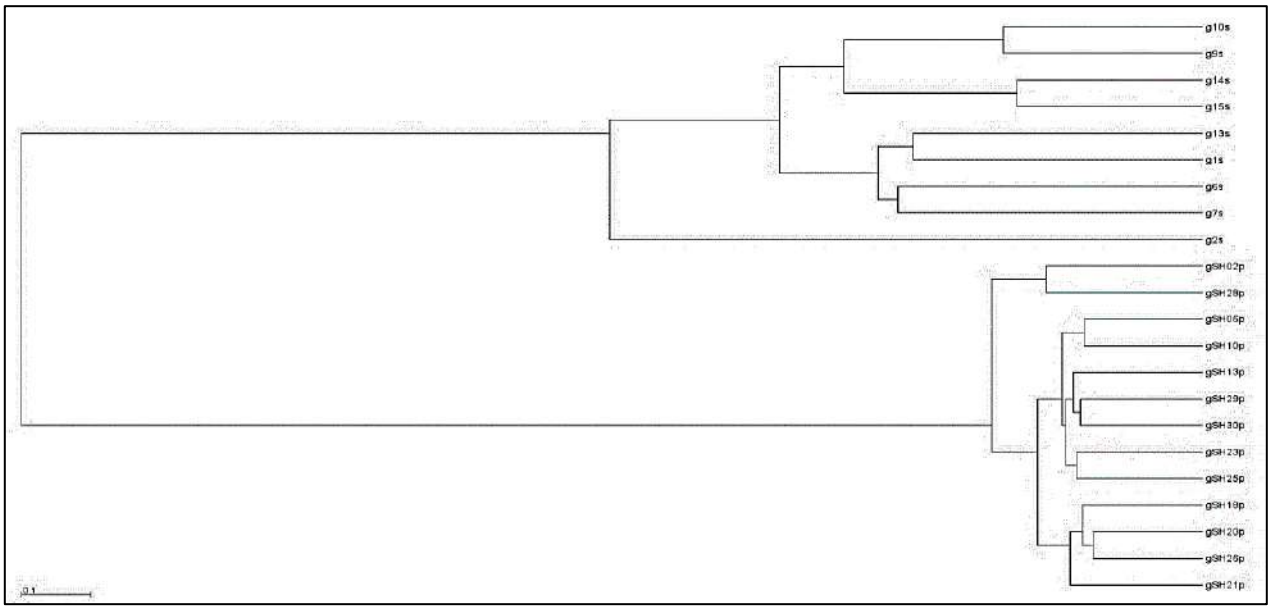


Figura 1. Dendrograma de distancias genéticas de 22 accesiones de chía silvestres y cultivadas.

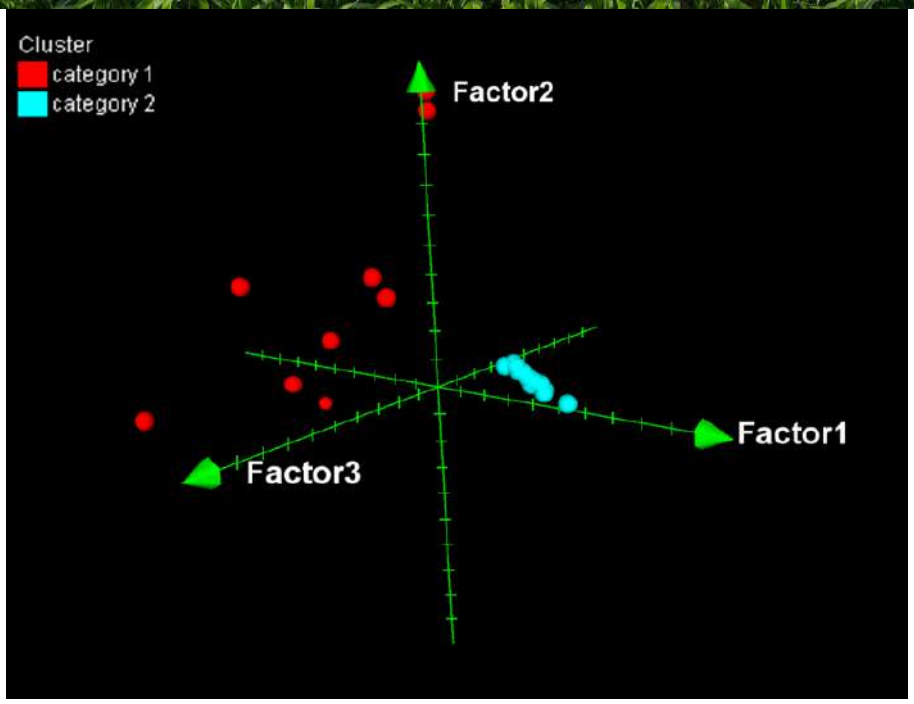


Figura 2. Análisis de escalamiento multidimensional de tres factores. Las accesiones silvestres corresponden a la categoría 1 y las cultivadas a la categoría 2.

Este patrón coincide con la reducción de diversidad asociada con la domesticación descrita por Cahill (2004) y Peláez et al. (2019), y podría ser consecuencia de cuellos de botella, efectos fundadores y de la selección de un número limitado de genotipos con características agronómicas deseables. Sin embargo, la menor dispersión de las accesiones cultivadas no podría atribuirse solamente a la selección, debido a que todas procedieron de una región geográfica restringida, mientras que las silvestres fueron recolectadas en diferentes estados de México.

Cuadro 2. Valores de los factores por accesión.

Accesión	Grupo	Factor1	Factor2	Factor3
g10s	1	-0.10578935	0.28724658	-0.11661501
g13s	1	-0.2068013	-0.06606421	0.07699788
g14s	1	-0.02650277	0.07095221	0.07204949
g15s	1	-0.063093	0.09092189	0.05662194

g1s	1	-0.13942696	0.00076578	0.0644361
g2s	1	-0.51381087	-0.23356178	-0.26839172
g6s	1	-0.19818447	0.08627411	0.15790292
g7s	1	-0.25979344	-0.07010747	0.2835579
g9s	1	-0.10751586	0.31315507	-0.11907586
gSH02p	2	0.13009163	-0.03997517	-0.0182388
gSH06p	2	0.12888811	-0.03862408	-0.01596455
gSH10p	2	0.1223284	-0.03440444	-0.01397063
gSH13p	2	0.11665581	-0.0280704	-0.01234923
gSH18p	2	0.10409801	-0.01699135	-0.00912867
gSH20p	2	0.0944728	-0.02008408	-0.00394264
gSH21p	2	0.10842622	-0.01906959	-0.00785315
gSH23p	2	0.14091083	-0.05274701	-0.01964588
gSH25p	2	0.13605179	-0.04225231	-0.01991782
gSH26p	2	0.11098696	-0.02512687	-0.00954986
gSH28p	2	0.16275828	-0.06867885	-0.03812159
gSH29p	2	0.13960493	-0.0504929	-0.02292305
gSH30p	2	0.12564424	-0.04306514	-0.01587779

Conclusiones

Las accesiones silvestres y cultivadas de chía mostraron diferencias en su diversidad genética con base en los marcadores SilicoDArT. Dentro del panel evaluado, las accesiones silvestres presentaron mayor heterocigosidad esperada, número efectivo de alelos, rareza y dispersión genética que las cultivadas. El AMOVA reveló una diferenciación significativa entre ambos grupos, mientras que el dendrograma basado en la distancia genética de Rogers y el escalamiento multidimensional mostraron una separación consistente entre las accesiones silvestres y cultivadas. Estos resultados resaltan la importancia de las accesiones silvestres como reservorios de diversidad genética y como recursos potenciales para la conservación, el aprovechamiento y el mejoramiento genético de *Salvia hispanica* L.

Literatura citada

Cahill, J. P. (2004). Genetic diversity among varieties of Chia (*Salvia hispanica* L.). *Genetic Resources and Crop Evolution, 51*, 773–781. https://doi.org/10.1023/B:GRES.0000034583.20407.80

Hernández-Gómez, J. A., & Miranda-Colín, S. (2008). Caracterización morfológica de chía (*Salvia hispanica*). *Revista Fitotecnia Mexicana, 31*(2), 105–113. https://doi.org/10.35196/rfm.2008.2.105

Hernández-Gómez, J. A., Miranda-Colín, S., & Peña-Lomelí, A. (2008). Cruzamiento natural de chía (*Salvia hispanica* L.). *Revista Chapingo Serie Horticultura, 14*(3), 331–337.

Hernández-Rodríguez, M., Ramos-García, A. A., Orozco-de Rosas, G., Velázquez-Castañeda, V., & García-Zavala, J. J. (2025). Diversidad genética de germoplasma de chía (*Salvia hispanica* L.) evaluada con marcadores SilicoDArT. En *Memorias del Congreso Internacional de Ciencias Agropecuarias* (pp. 400–404).

Lara-Cabrera, S. I., Ramírez-Amezcua, Y., Cárdenas, N. C., Fisher, A. E., & Fernández-Alonso, J. L. (2024). Chía and its wild relatives: A superfood *Salvia* (Lamiaceae). *Plants, People, Planet, 6*(6), 1284–1292. https://doi.org/10.1002/ppp3.10543

Pacheco-Gil, R. Á., Alvarado, G., Rodríguez, F., Burgueño, J. (2016). BIO-R (Biodiversity analysis with R for Windows) Version 3.3. CIMMYT Research Data & Software Repository Network, V14 https://hdl.handle.net/11529/10820

Palma-Rojas, C., Gonzalez, C., Carrasco, B., Silva, H., & Silva-Robledo, H. (2017). Genetic, cytological and molecular characterization of chia (*Salvia hispanica* L.) provenances. *Biochemical Systematics and Ecology, 73*, 16–21. https://doi.org/10.1016/j.bse.2017.05.003

Peláez, P., Orona-Tamayo, D., Montes-Hernández, S., Valverde, M. E., Paredes-López, O., & Cibrián-Jaramillo, A. (2019). Comparative transcriptome analysis of cultivated and wild seeds of *Salvia hispanica* (chia). *Scientific Reports, 9*, 9761. https://doi.org/10.1038/s41598-019-45895-5

Diversidad genética de una colección núcleo de canela (*Cinnamomum verum* J. Presl*)* con marcadores SilicoDArT

Iseli Sánchez Álvarez[55], Martha Hernández Rodríguez, José Jesús García Zavala, Olga Santiago Trinidad[56]

Resumen

La canela (*Cinnamomum verum* J. Presl) ingresó a México en la década de 1960 y en la actualidad prospera en diversas regiones del trópico húmedo y subhúmedo del país; sin embargo, el germoplasma nacional carece de caracterización genética. Esta limitante cobra relevancia porque diversos instrumentos internacionales restringen el acceso al germoplasma del centro de origen, condición que confiere valor estratégico al material establecido en el territorio. Este estudio evaluó la variación genética y las relaciones entre ocho accesiones de la colección núcleo de canela del Campo Experimental El Palmar del INIFAP, correspondientes a árboles seleccionados para la producción de semilla, mediante marcadores SilicoDArT. El DNA se aisló con un protocolo optimizado basado en CTAB con un sistema detergente bimodal y las muestras se genotipificaron mediante tecnología DArTseq en el Servicio de Análisis de Genotipificación para la Agricultura del CIMMYT. De 48,826 marcadores generados, la depuración retuvo 27,068 tras aplicar filtros de reproducibilidad, datos faltantes y monomorfismo. Los indicadores de diversidad por locus fueron: heterocigosidad esperada de 0.341 ± 0.0007, número de alelos efectivos de 1.564 ± 0.0017 e índice de Shannon de 0.747 ± 0.0011. El análisis molecular de varianza atribuyó 79.06 % de la variación al interior de los grupos. Las distancias de Rogers modificadas variaron de 0.449 a 0.749, sin pares de accesiones con valores cercanos a cero. Estos hallazgos indican una diversidad de moderada a alta, congruente con la polinización cruzada de la especie, y confirman que los árboles seleccionados corresponden a genotipos distintos.

Palabras clave: germoplasma, marcadores dominantes, DArTseq, distancia de Rogers modificada, dicogamia protogínica.

Abstract

Cinnamon (*Cinnamomum verum* J. Presl) was introduced to Mexico in the 1960s and at present thrives in several humid and subhumid tropical regions of the country; however, the

[55] Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Programa de Genética. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56264. sanchez.iseli@colpos.mx; hernandez.martha@colpos.mx; zavala@colpos.mx

[56] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental El Palmar. Tezonapa, Veracruz, C. P. 95080. santiago.olga@inifap.gob.mx

national germplasm lacks genetic characterization. This limitation gains relevance because international instruments restrict access to germplasm from the center of origin, a condition that confers strategic value on the material already established in the country. This study assessed genetic variation and relationships among eight accessions of the cinnamon core collection at El Palmar Experimental Station (INIFAP), corresponding to trees selected for seed production, using SilicoDArT markers. DNA was isolated with an optimized CTAB-based protocol with a bimodal detergent system, and the samples were genotyped by DArTseq technology at the Genotyping Analysis Service for Agriculture (SAGA) of CIMMYT. Of the 48,826 markers generated, 27,068 were retained after filtering for reproducibility, missing data and monomorphism. Diversity indicators per locus were: expected heterozygosity of 0.341 ± 0.0007, number of effective alleles of 1.564 ± 0.0017 and Shannon index of 0.747 ± 0.0011. Analysis of molecular variance (AMOVA) attributed 79.06% of the variation to within-group differences. Modified Rogers distances ranged from 0.449 to 0.749, with no pair of accessions showing values close to zero. These findings indicate moderate to high diversity, consistent with the outcrossing mating system of the species, and confirm that the selected trees correspond to distinct genotypes.

Keywords: germplasm, dominant markers, DArTseq, modified Rogers distance, protogynous dichogamy.

Introducción

La canela (*Cinnamomum verum* J. Presl), especie de la familia Lauraceae originaria de Sri Lanka (Mabberley, 2008), ingresó a México entre 1960 y 1967, a través de propagación sexual (semilla botánica) y asexual (estacas). Desde entonces, el Campo Experimental El Palmar, en Tezonapa, Veracruz, consolidó este germoplasma en una colección núcleo de accesiones madre, de la selección de árboles para producción de semilla y de la distribución del material hacia otras regiones del país (O. Santiago Trinidad, investigadora del INIFAP, comunicación personal, 2024). El acceso al germoplasma del centro de origen se encuentra regulado por instrumentos internacionales sobre recursos genéticos (Naciones Unidas, 1992), condición que otorga un valor estratégico al material establecido en México antes de esa regulación.

El consumo de esta especia, asociado principalmente a su uso culinario, posicionó a México en el tercer lugar mundial de importaciones por volumen en 2024 con 9,258 t (FAO, 2024). Aunque el cultivo se encuentra establecido en diversas regiones tropicales y subtropicales del territorio, la investigación científica nacional sobre la especie es escasa, en parte por tratarse de una especia comprendida entre los cultivos subutilizados (Padulosi et al., 2013).

En consecuencia, las accesiones cultivadas en el país aún carecen de una caracterización genética, punto de partida indispensable para el manejo del germoplasma.

La caracterización genética de individuos y poblaciones requiere herramientas capaces de detectar polimorfismos en la secuencia de DNA, es decir, marcadores moleculares. Estos marcadores generan datos discretos, estables, heredables, independientes del ambiente y de la etapa de desarrollo de la planta (Barcaccia, 2009; Duran et al., 2009) y reflejan la identidad del genoma. Entre ellos, los marcadores dominantes SilicoDArT utilizan secuenciación de nueva generación (DArTseq) para registrar en código binario la presencia o ausencia de fragmentos de restricción en representaciones genómicas obtenidas por reducción de complejidad (Jaccoud et al., 2001; Kilian et al., 2012). Su polimorfismo obedece en gran medida a cambios de una sola base en los sitios de reconocimiento de la enzima y, en menor proporción, a inserciones o deleciones y a polimorfismos de metilación de citosinas cuando se emplean enzimas sensibles a este proceso (Sansaloni et al., 2020). Al prescindir de un genoma de referencia, la plataforma resulta idónea para especies que carecen de ensamblaje previo (Adu et al., 2021). Mediante una alta densidad de marcadores y amplia cobertura genómica, el análisis de estos datos estima la diversidad génica, el número de alelos efectivos y las distancias genéticas entre accesiones.

El Campo Experimental El Palmar resguarda un lote de árboles seleccionados para la producción de semilla, cuyo germoplasma abastece el establecimiento del cultivo en otras regiones. Puesto que la dicogamia protogínica de la especie promueve la polinización cruzada entre los progenitores del lote (Azad et al., 2024), la composición genética de esas plantas determina la variabilidad heredada por la progenie distribuida. Por ello, la evaluación del grado de diversidad y de las relaciones genéticas entre las accesiones fundamenta las decisiones de manejo del germoplasma y constituye una referencia inicial del material genético disponible en el país.

Se planteó como hipótesis que la colección núcleo de canela del Campo Experimental El Palmar conserva un nivel de diversidad genética superior al informado para especies de polinización autógama evaluadas con la misma plataforma, acorde con el sistema de polinización cruzada de la canela, y que los árboles seleccionados corresponden a genotipos distintos, sin redundancia clonal.

El objetivo de esta investigación fue estimar la diversidad génica, el número de alelos efectivos y las distancias genéticas entre las accesiones de canela del Campo Experimental El Palmar mediante marcadores SilicoDArT.

Materiales y métodos

Material Vegetal

Las accesiones evaluadas provinieron de la colección de canela resguardada en el Campo Experimental El Palmar del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado en Tezonapa, Veracruz, México. Se evaluaron ocho accesiones (CZ01 a CZ08) correspondientes a árboles seleccionados para la producción de semilla. El tejido foliar se colectó en diciembre de 2025. Cada accesión correspondió a un árbol individual y se procesó por separado. De cada árbol se seleccionaron visualmente hojas maduras procedentes de brotes recientes, que se lavaron con agua destilada para eliminar impurezas superficiales y se secaron a temperatura ambiente (25 ± 3 °C). Las hojas se colocaron en bolsas herméticas y se conservaron a 4 °C hasta su procesamiento.

Extracción de DNA

Se empleó un protocolo basado en bromuro de cetiltrimetilamonio (CTAB) optimizado específicamente para tejido foliar de canela, debido a que la especie presenta una alta concentración de metabolitos especializados con efecto de interferencia en la obtención de ácidos nucleicos. Se pesaron 100 mg de tejido foliar en balanza analítica y se pulverizaron en un mortero estéril con nitrógeno líquido y 20 mg de polivinilpirrolidona (PVP-40) hasta obtener un polvo fino, sin permitir la descongelación de la muestra. El material se transfirió a microtubos de polipropileno de 2 mL para su almacenamiento a −80 °C hasta la fase de extracción.

La solución amortiguadora de extracción se preparó con Trizma base 100 mM pH 7.5, NaCl 5M y EDTA 50 mM; antes de agregar el CTAB al 2 % (Sigma, No. M-7635), la solución se calentó a 65 °C para asegurar su completa solubilidad, y el β-mercaptoetanol al 1 % (Sigma, No. M-6250) se agregó justo antes de su uso. El tejido pulverizado se resuspendió en 1 mL de esta solución adicionada con N-lauroil sarcosina (Sarcosyl) al 1 %. Ambos detergentes conformaron un sistema detergente bimodal. La incubación transcurrió a 25 ± 3 °C durante 60 min, a diferencia de los 60 a 65 °C de los protocolos convencionales; esta temperatura moderada redujo la oxidación térmica de los metabolitos especializados y previno la formación de mucílago, factor limitante en la manipulación de la fase acuosa. Para la purificación se añadió 1 mL de fenol:cloroformo (1:1, v/v), con agitación mecánica durante 10 min y se centrifugación a 12,716 × g durante 10 min. Tras recuperar la fase acuosa, se añadieron 2 µL de RNasa A (10 mg mL^{-1}) con incubación de 5 min para eliminar el RNA residual, seguido de una segunda purificación con cloroformo:alcohol isoamílico (24:1, v/v) en las mismas condiciones. El DNA se precipitó con 0.6 volúmenes de isopropanol frío (−4 °C) por cada volumen de fase acuosa, la mezcla se incubó a −20 °C durante 2 h, y se centrifugó a 12,716 ×g durante 10 min. El precipitado se enjuagó con 1 mL de etanol al 70 % (v/v) enfriado a −4 °C, con centrifugación posterior a 6,153 ×g durante 5 min y el solvente

se evaporó a 25 °C durante 30 min. El precipitado se hidrató con 30 µL de solución TE (Trizma·base 10 mM, EDTA 1 mM; pH 8.0) y se almacenó a −20 °C.

La concentración en ng μL^{-1} y la pureza se cuantificaron por espectrofotometría en un equipo NanoDrop ND-2000 (Thermo Scientific, Waltham, MA, USA), con 1.2 µL de muestra depositados sobre el pedestal. Se consideraron aptas solo las muestras con cocientes 260/280 y 260/230 dentro del intervalo de 1.8 a 2.0. Para confirmar la integridad de la molécula, el DNA migró en una electroforesis con gel de agarosa al 1 % (Sigma, St. Louis, MO, USA), adicionado bromuro de etidio a una concentración final de 1 µg mL^{-1}. En cada carril se depositaron 2 µL de DNA combinado con 3 µL de solución de carga 5X (Trizma 50 mM a pH 8.0, EDTA 5 mM a pH 8.0, sacarosa al 25 % y azul de bromofenol a 2 mg mL^{-1}). En los extremos del gel se cargaron 3 µL de DNA de fago Lambda (25 ng μL^{-1}) como testigo de integridad. La electroforesis se desarrolló a 80 V durante 40 min con amortiguador Tris-Borato 90mM, EDTA 2Mm, pH 8.0 (TBE 1X), y las bandas se registraron en un fotodocumentador MiniBis Pro (DNR Bio-Imaging, Neve Yamin, Israel).

Genotipificación y Análisis de Datos

De cada muestra se preparó una alícuota de 50 µL ajustada a 150 ng μL^{-1}, enviada al Servicio de Análisis de Genotipificación para la Agricultura (SAGA) del CIMMYT, en Texcoco, Estado de México, para su genotipificación mediante la plataforma DArTseq. Las bibliotecas se secuenciaron en un NovaSeq-6000 (Illumina, San Diego, CA, USA). Los resultados conformaron una matriz binaria en hoja de cálculo, en la que el valor 1 corresponde a la detección del fragmento y el valor 0 a su ausencia. Sobre esa matriz se aplicaron tres criterios de depuración: reproducibilidad igual o superior a 0.96, presencia del marcador en al menos siete de las ocho accesiones y polimorfismo entre ellas. El umbral de reproducibilidad corresponde al adoptado por Ruiz-Hernández et al. (2026) en germoplasma de moringa evaluado con la misma plataforma.

No se aplicó un umbral de frecuencia del alelo menor: con ocho accesiones, el valor mínimo posible distinto de cero (0.125) supera cualquier umbral convencional. Sobre los marcadores retenidos se estimaron cinco parámetros, tanto a nivel de locus como de accesión: el porcentaje de loci polimórficos (P), la heterocigosidad esperada (He; Nei, 1973), el número de alelos efectivos (Ae), índice de rareza (Ar) y el índice de Shannon (I). Con el mismo conjunto se ejecutó un análisis de varianza molecular (AMOVA), se calcularon las distancias de Rogers modificadas (Rogers, 1972) entre pares de accesiones y las coordenadas del escalamiento multidimensional (MDS). Estos análisis se ejecutaron en Bio-R versión 3.2 (Pacheco-Gil et al., 2016), con un porcentaje de datos faltantes fijado en 0.13 y un nivel de significancia de 0.05; el valor de probabilidad del AMOVA proviene de las permutaciones. Para cada par de accesiones se emplearon únicamente los marcadores sin datos faltantes en

ambas (eliminación por pares). A partir de esa matriz, el agrupamiento jerárquico por el método de promedios entre grupos (UPGMA), el mapa de calor y la representación del MDS se elaboraron en R versión 4.4.1 (R Core Team, 2024), con el paquete ape (Paradis y Schliep, 2019).

Resultados y discusión

La plataforma generó 48,826 marcadores SilicoDArT para el panel de ocho accesiones de canela. La depuración descrita redujo ese total a 27,068 marcadores, los cuales sustentaron la totalidad de los análisis estadísticos. Los estimadores promedio por locus fueron: He = 0.341 ± 0.0007, Ae = 1.564 ± 0.0017 e I = 0.747 ± 0.0011. La interpretación de estos valores exige considerar los límites teóricos del marcador. En marcadores dominantes la heterocigosidad esperada alcanza un máximo de 0.5, cuando ambos estados ocurren con igual frecuencia, y el número de alelos efectivos llega a 2, mientras que un valor de 1 denota ausencia de variación en el locus (Ruiz-Hernández et al., 2026). Bajo esta escala, los registros por locus corresponden a un nivel de diversidad de moderado a alto, en tanto que los valores por accesión se aproximan al máximo teórico.

Esta magnitud de diversidad concuerda con el sistema reproductivo de la especie. La dicogamia protogínica de la canela promueve la polinización cruzada y restringe la autofecundación, de manera que el material establecido a partir de progenies de polinización libre retiene una elevada variabilidad entre individuos. En análisis con el mismo tipo de marcador, las especies alógamas presentan valores superiores a los de las autógamas. La He promedio por accesión en canela (0.485; Cuadro 1) resultó comparable a la de poblaciones de moringa cultivada en México, entre 0.42 y 0.50 (Ruiz-Hernández et al., 2026), y a la de 22 poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos de México, entre 0.388 y 0.477 (Reyes-Correa et al., 2026). En contraste, las especies de polinización con tendencia autógama registran valores inferiores: la chía, 0.211 (Hernández-Rodríguez et al., 2025); la macadamia, 0.16 en 80 cultivares (Alam et al., 2018); y el chile de onza, 0.14 (Fernández-Diego et al., 2025). Cada uno de estos estudios evaluó un número distinto de accesiones y aplicó criterios propios de filtrado, por lo cual sus valores no son comparables de forma estricta.

Cuadro 4. Valores de los indicadores de diversidad de ocho accesiones de la colección núcleo de canela.

Accesión	He	Ae	Ar	Grupo
CZ01	0.464	1.865	2,024.53	1
CZ02	0.476	1.909	2,281.76	1
CZ03	0.494	1.975	3,319.69	2

CZ04	0.500	2.000	2,550.76	1
CZ05	0.500	1.999	2,486.61	2
CZ06	0.466	1.874	3,029.25	2
CZ07	0.499	1.998	1,977.69	1
CZ08	0.481	1.928	2,106.85	1
Promedio	0.485	1.944	2,472.14	—

He: heterocigosidad esperada; Ae: alelos efectivos; Ar: alelos raros. Datos obtenidos de Bio-R v 3.2 (Pacheco-Gil et al., 2016).

A nivel de accesiones, los indicadores de diversidad presentaron valores similares. La He varió de 0.464 a 0.500 (promedio de 0.485), el Ae de 1.865 a 2.000 (promedio de 1.944) y el índice de rareza de 1,978 a 3,320 (promedio de 2,472) (Cuadro 1). La accesión CZ01 registró el menor valor de He y CZ04 el mayor. Las medias se aproximan al límite teórico de la plataforma (0.5 para He y 2 para Ae), condición que indica una distribución equilibrada de los estados de presencia y ausencia en cada individuo. Esta homogeneidad refleja que ninguna accesión concentra la diversidad genética del conjunto, característica favorable para el manejo de la colección, ya que sugiere una contribución genética equilibrada de los árboles a la progenie. La amplitud de los valores de rareza destacó a CZ03, CZ06 y CZ04 como las accesiones con mayor riqueza de alelos raros; estas variantes poco compartidas con el resto de la colección constituyen la fracción de la diversidad más susceptible, de modo que su conservación resulta prioritaria.

El tamaño del muestreo condiciona la interpretación directa de esta comparación con otros estudios poblacionales. Con ocho accesiones, la frecuencia mínima posible del estado menos común equivale a 0.125, de modo que ningún marcador polimórfico registra una He inferior a 0.219; este límite disminuye a medida que aumenta el número de individuos evaluados.

El tamaño del muestreo condiciona la interpretación directa de esta comparación con otros estudios poblacionales. La heterocigosidad esperada de un marcador dominante se calcula como:

$$He = 2pq \tag{1}$$

donde p es la frecuencia del estado presente y q = 1 − p. Con ocho accesiones, la frecuencia mínima posible del estado menos común equivale a 0.125, de modo que ningún marcador

polimórfico registra una He inferior a 2(0.125)(0.875) = 0.219. Este límite disminuye a medida que aumenta el número de individuos evaluados.

El análisis molecular de varianza distribuyó la variación en 79.06 % atribuible a diferencias dentro de los grupos y 20.94 % a diferencias entre ellos (Df = 1 y 6 para las fuentes entre y dentro de grupos, de forma respectiva; ΦST = 0.209; p = 0.018). Este resultado indica que la mayor proporción de la diversidad reside entre las accesiones que integran un mismo grupo y no entre los agrupamientos formados, hallazgo que respalda la conservación del conjunto completo de genotipos seleccionados en lugar de retener únicamente representantes de cada grupo. El predominio de la variación dentro de los grupos coincide con lo informado en otras colecciones evaluadas con marcadores dominantes, como moringa, con 57.17 % (Ruiz-Hernández et al., 2026), y chile de onza, con 88 % (Fernández-Diego et al., 2025). Puesto que los grupos surgieron de las distancias genéticas calculadas y no de una clasificación previa, el valor de significancia estadística no comprueba la existencia de subpoblaciones naturales. Aun así, los porcentajes de varianza describieron cómo se distribuye la variación molecular respecto a la agrupación de las ocho accesiones.

El análisis de relaciones genéticas basado en distancias de Rogers modificadas delimitó dos grupos (Figura 1). El Grupo I integró las accesiones CZ01, CZ02, CZ04, CZ07 y CZ08; el Grupo II, CZ03, CZ05 y CZ06. La diversidad dentro de los grupos alcanzó 0.284 en el Grupo I y 0.306 en el Grupo II, en tanto que la diversidad entre grupos fue de 0.135. El Grupo II, además de exhibir la mayor diversidad interna, registró valores promedio más altos del índice de rareza.

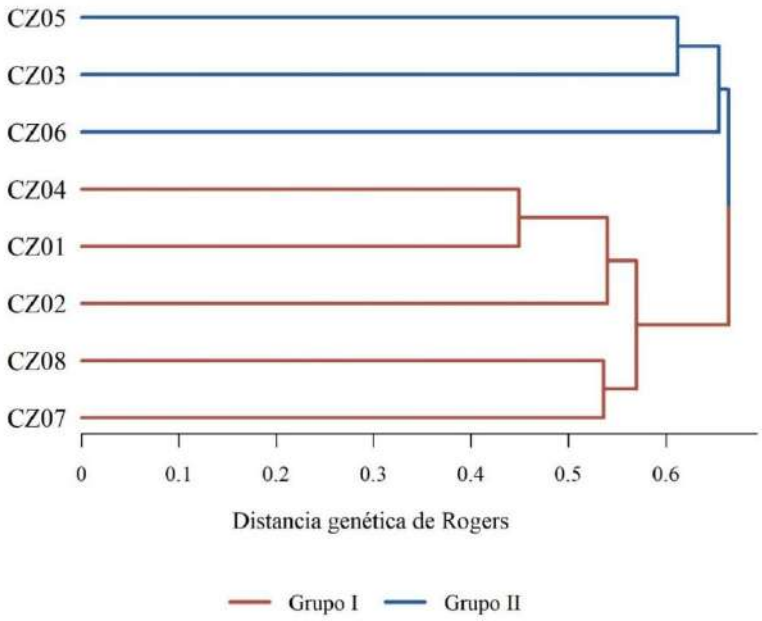


Figura 6. Dendrograma de las ocho accesiones de la colección núcleo de canela del Campo Experimental El Palmar, obtenido por agrupamiento jerárquico con el método de promedios entre grupos (UPGMA) a partir de distancias genéticas de Rogers modificadas.

El eje horizontal expresa la distancia de Rogers modificada; los colores distinguen los dos grupos identificados. Datos obtenidos de Bio-R v 3.2 (Pacheco-Gil et al., 2016).

Las distancias de Rogers modificadas entre pares de accesiones variaron de 0.449 a 0.749 (Figura 2). El par con menor distancia correspondió a CZ01–CZ04 (0.449), concordante con su agrupamiento conjunto, en contraste, los más distantes correspondieron a CZ03–CZ04 (0.749) y CZ02–CZ03 (0.734). La distancia media entre grupos fue de 0.664, valor apenas superior a la media interna del Grupo II (0.640) y mayor que la del Grupo I (0.548), de manera que la separación entre ambos grupos resultó real, pero de magnitud reducida. Esta magnitud concuerda con el 20.94 % de la variación atribuida a las diferencias entre grupos en el análisis de varianza molecular. Ningún par registró una distancia cercana a cero, resultado que descarta la presencia de duplicados clonales dentro de la colección núcleo y confirma que los ocho árboles seleccionados representan genotipos distintos. Este hallazgo tiene una implicación práctica directa: la colección resguarda ocho unidades genéticas independientes y no material redundante propagado por vía vegetativa.

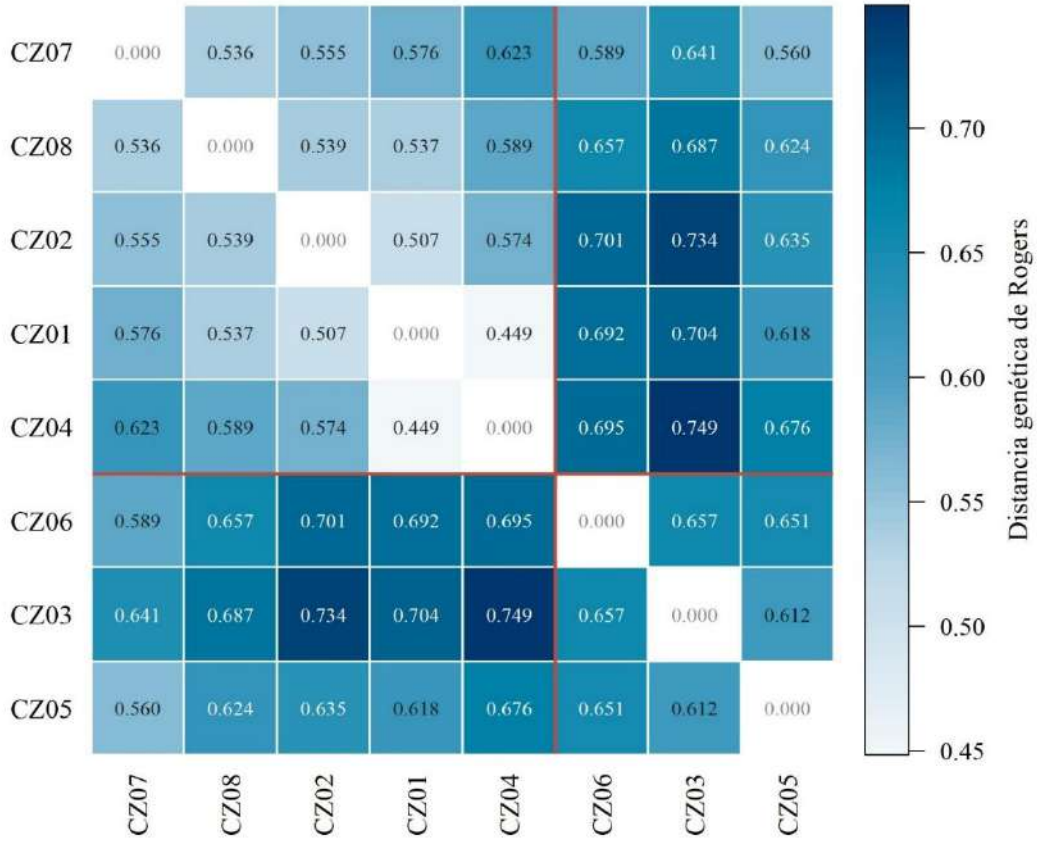


Figura 7. Mapa de calor de distancias de Rogers modificadas entre ocho accesiones de la colección núcleo de canela, con base en 27 068 marcadores SilicoDArT. Datos obtenidos de Bio-R v 3.2 (Pacheco-Gil et al., 2016).

El escalamiento multidimensional mostró que los tres primeros componentes explicaron 29.40 %, 16.69 % y 15.06 % de la variación, para un acumulado de 61.15 %. La Figura 3 presenta las dos primeras coordenadas, que en conjunto explican 46.09 % de la variación. El primer componente ordenó a los dos grupos sin traslape: las tres accesiones del Grupo II registraron los valores más altos, de 0.163 a 0.362, en contraste con las cinco del Grupo I quedaron por debajo de 0.05, cuatro de ellas en el extremo negativo y CZ07 próxima al origen. CZ03 y CZ06 ocuparon las posiciones más alejadas del origen, acordes con sus mayores distancias de Rogers respecto de las demás accesiones. El porcentaje acumulado

supera al reportado en paneles más numerosos analizados con marcadores dominantes: 28.94 % en 17 poblaciones de chile de onza (Fernández-Diego et al., 2025) y 14.14 % en 60 genotipos de chía (Hernández-Rodríguez et al., 2025). Al evaluar solo ocho árboles, la variación total se reparte entre pocas dimensiones, de modo que la magnitud observada obedece al tamaño reducido de la colección. Esta ordenación coincide con la topología del dendrograma, ya que ambos análisis parten de la misma matriz de distancias.

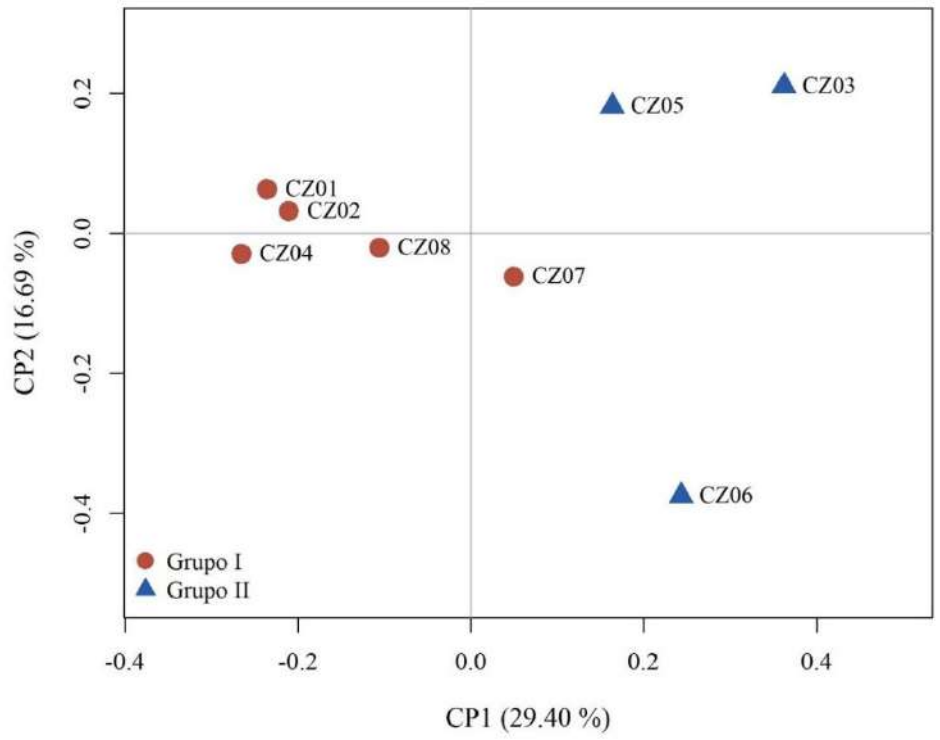


Figura 8. Escalamiento bidimensional del escalamiento multidimensional de ocho accesiones de la colección núcleo de canela con base en 27 068 marcadores SilicoDArT**.**
Datos obtenidos de Bio-R v 3.2 (Pacheco-Gil et al., 2016).

El alcance de estos resultados está delimitado por tres condiciones. El panel se restringe a ocho árboles, uno por accesión, de modo que los estimadores describen la colección núcleo evaluada y no admiten extrapolación al germoplasma establecido en el país. El carácter dominante de los marcadores impide estimar la heterocigosidad observada y, con ella, los coeficientes de endogamia. Al haberse definido los grupos a partir de la propia matriz de

distancias, el valor de significancia del AMOVA no constituye una prueba independiente de estructura poblacional.

Conclusiones

La colección núcleo de canela del Campo Experimental El Palmar conserva un nivel de diversidad genética de moderado a alto, congruente con la polinización cruzada favorecida por la dicogamia protogínica de la especie. Los indicadores de diversidad presentaron valores similares entre las ocho accesiones; por consiguiente, ninguna concentra la variación del conjunto. La ausencia de distancias genéticas cercanas a cero indica que los árboles seleccionados representan genotipos distintos y descarta la presencia de duplicados clonales. La mayor proporción de la variación se distribuyó principalmente dentro de los grupos, patrón que señala que la diversidad reside entre las accesiones que componen cada grupo y sustenta la conservación de la colección completa como fuente de material reproductivo.

Literatura citada

Libros y capítulos

Barcaccia, G. (2009). Molecular markers for characterizing and conserving crop plant germplasm. En S. M. Jain y D. S. Brar (Eds.), *Molecular Techniques in Crop Improvement* (2.ª ed., pp. 231–254). Springer. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2967-6_10

Fernández-Diego, F. E., Hernández-Rodríguez, M., Hernández-Livera, A., Pineda-Pineda, J., y García-de los Santos, G. (2025). Evaluación de la diversidad genética de germoplasma criollo de chile de onza (*Capsicum annuum* L.) con marcadores SilicoDArT. En R. Trucíos Caciano, Y. Moreno Sepúlveda y M. Ramírez Carrillo (Comps.), *Memorias del 4to Congreso Interamericano de Agua, Suelo y Agrobiodiversidad* (pp. 379–382). Ciudad de México, México, 11–13 de agosto de 2025. ISSN 2992-8168.

Hernández-Rodríguez, M., Ramos-García, A. A., Orozco-de Rosas, G., Velázquez-Castañeda, V., García-Zavala, J. J., Lobato-Ortiz, R., y Lara-Cabrera, S. I. (2025). Diversidad genética de germoplasma de chía (*Salvia hispanica* L.) evaluada con marcadores SilicoDArT. En R. Trucíos Caciano, Y. Moreno Sepúlveda y M. Ramírez Carrillo (Comps.), *Memorias del 4to Congreso Interamericano de Agua, Suelo y Agrobiodiversidad* (pp. 400–404). Ciudad de México, México, 11–13 de agosto de 2025. ISSN 2992-8168.

Kilian, A., Wenzl, P., Huttner, E., Carling, J., Xia, L., Blois, H., Caig, V., Heller-Uszynska, K., Jaccoud, D., Hopper, C., Aschenbrenner-Kilian, M., Evers, M., Peng, K., Cayla, C., Hok, P., y Uszynski, G. (2012). Diversity arrays technology: A generic genome profiling technology on open platforms. En F. Pompanon y A. Bonin (Eds.), *Data Production and*

Analysis in Population Genomics (pp. 67–89). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-870-2_5

Mabberley, D. J. (2008). *Mabberley's Plant-Book: A Portable Dictionary of Plants, Their Classifications and Uses* (3.ª ed.). Cambridge University Press.

Padulosi, S., Thompson, J., y Rudebjer, P. (2013). *Fighting Poverty, Hunger and Malnutrition with Neglected and Underutilized Species (NUS): Needs, Challenges and the Way Forward*. Bioversity International.

Rogers, J. S. (1972). Measures of genetic similarity and genetic distance. *Studies in Genetics VII, University of Texas Publication*, 7213, 145–153.

Revistas

Adu, B. G., Akromah, R., Amoah, S., Nyadanu, D., Yeboah, A., Aboagye, L. M., Amoah, R. A., y Owusu, E. G. (2021). High-density DArT-based SilicoDArT and SNP markers for genetic diversity and population structure studies in cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *PLoS ONE*, *16*(8), e0255290. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255290

Alam, M., Neal, J. M., O'Connor, K. M., Kilian, A., y Topp, B. (2018). Ultra-high-throughput DArTseq-based SilicoDArT and SNP markers for genomic studies in macadamia. *PLoS ONE*, *13*(8), e0203465. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203465

Azad, R., Jayaprada, N. V. T., Ranaweera, S. A., Ranawaka, R. A. A. K., Jayasekara, L., Senanayake, G., Hirotoshi, T., y Geekiyanage, S. (2024). Diversity and morpho-chemo correlations of cinnamon (*Cinnamomum verum* J. Presl) bark oil from Sri Lanka. *Journal of Agriculture and Food Research*, *18*, 101500. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101500

Duran, C., Appleby, N., Edwards, D., y Batley, J. (2009). Molecular genetic markers: Discovery, applications, data storage and visualisation. *Current Bioinformatics*, *4*(1), 16–27. https://doi.org/10.2174/157489309787158198

Jaccoud, D., Peng, K., Feinstein, D., y Kilian, A. (2001). Diversity arrays: A solid state technology for sequence information independent genotyping. *Nucleic Acids Research*, *29*(4), e25. https://doi.org/10.1093/nar/29.4.e25

Nei, M. (1973). Analysis of gene diversity in subdivided populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *70*(12), 3321–3323. https://doi.org/10.1073/pnas.70.12.3321

Paradis, E., y Schliep, K. (2019). ape 5.0: An environment for modern phylogenetics and evolutionary analyses in R. *Bioinformatics*, *35*(3), 526–528. https://doi.org/10.1093/bioinformatics/bty633

Reyes-Correa, A. P., Hernández-Rodríguez, M., García-Zavala, J. J., Benítez-Riquelme, I., Trejo-Pastor, V., Lobato-Ortiz, R., y López-Martínez, M. I. (2026). Diversidad de poblaciones de maíz adaptadas a Valles Altos de México analizadas mediante marcadores silicoDArT. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *49*(2), 143–152.

Ruiz-Hernández, R., Hernández-Rodríguez, M., Pérez-Vázquez, A., Ramírez-Rivera, E. de J., López-Romero, G., Bautista-Aguilar, J. R., Hernández-Chontal, M. A., y Salas-Valdez, O. (2026). Application of SilicoDArT markers for the analysis of genetic diversity and population structure in *Moringa oleifera* Lam. cultivated in Mexico. *Horticulturae*, *12*(6), 729. https://doi.org/10.3390/horticulturae12060729

Sansaloni, C., Franco, J., Santos, B., Percival-Alwyn, L., Singh, S., Petroli, C., Campos, J., Dreher, K., Payne, T., Marshall, D., Kilian, B., Milne, I., Raubach, S., Shaw, P. D., Stephen, G., Carling, J., Pierre, C. S., Burgueño, J., Crossa, J., y Pixley, K. (2020). Diversity analysis of 80,000 wheat accessions reveals consequences and opportunities of selection footprints. *Nature Communications*, *11*, 4572. https://doi.org/10.1038/s41467-020-18404-w

Referencias electrónicas

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2024). *FAOSTAT: Cultivos y productos de ganadería*. Recuperado en agosto de 2026, de https://www.fao.org/faostat/es/#data/TCL

Naciones Unidas. (1992). *Convenio sobre la Diversidad Biológica*. https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-es.pdf

Pacheco-Gil, R., Alvarado, G., Rodríguez, F., y Burgueño, J. (2016). *BIO-R (Biodiversity Analysis with R for Windows)* (Versión 3.2) [Software]. CIMMYT Research Data & Software Repository Network. https://hdl.handle.net/11529/10820

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/

Evaluación de atributos morfológicos y de calidad del fruto en selecciones de aguacate 'Hass' (*Persea americana* Mill.) de huertos comerciales de Michoacán, México

Nelly Guadalupe Esquivel Miguel[57], Pedro Antonio García Saucedo, Víctor Manuel Coria Ávalos, Alejandro Facundo Barrientos Priego[58]

Resumen

El cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill.) 'Hass' constituye una de las principales actividades frutícolas de México; sin embargo, la limitada variabilidad del cultivar ha incrementado el interés por identificar selecciones con características agronómicas sobresalientes. El objetivo del presente estudio fue evaluar los atributos morfológicos y el contenido de materia seca (%) y de aceite en selecciones de aguacate 'Hass' provenientes de huertos comerciales de Michoacán, México. Se evaluaron seis materiales (dos testigos y cuatro selecciones) establecidos en los municipios de Tancítaro y Ziracuaretiro. Se seleccionaron cinco árboles por material y se analizaron variables morfológicas de hoja y fruto mediante descriptores del IPGRI, UPOV y Barrientos-Priego et al. (2010). Asimismo, se determinó el contenido de materia seca y aceite del fruto. Los datos se analizaron mediante análisis de componentes principales, análisis de varianza, prueba de Tukey (α=0.05), correlación de Pearson y regresión lineal. El análisis de componentes principales explicó el 48.6 % de la variación total y mostró que el porcentaje de materia seca, contenido de aceite y espesor de la cáscara fueron las variables que más contribuyeron a la diferenciación de las selecciones. La selección AHS2 presentó los mayores contenidos de materia seca y aceite, mientras que AHS4 registró los valores más bajos. Además, se observó una correlación positiva y altamente significativa entre la materia seca y el contenido de aceite ($r = 0.8656$; $R^2 = 0.7493$). Se concluyó que las selecciones evaluadas presentan variación morfológica y fisicoquímica, aportando información para la identificación y selección de materiales élite de aguacate 'Hass' con atributos de calidad e interés comercial y potencial para programas de mejoramiento genético.

Palabras clave: *Persea americana*; atributos morfológicos; materia seca; contenido de aceite; calidad del fruto.

[57] Facultad Agrobiología "Presidente Juárez", Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Uruapan, Michoacán, México. 0304767a@umich.mx
[58] Universidad Autónoma Chapingo (UACh), Departamento de Fitotecnia, Texcoco, Estado de México, México

Abstract

'Hass' avocado (*Persea americana* Mill.) is one of the most important fruit crops in Mexico; however, the limited variability within this cultivar has increased interest in identifying selections with outstanding agronomic traits. The objective of this study was to evaluate morphological traits, fruit dry matter (%) and oil content in 'Hass' avocado selections from commercial orchards in Michoacán, Mexico. Six materials (two commercial controls and four selections) established in the municipalities of Tancítaro and Ziracuaretiro were evaluated. Five trees per material were selected, and morphological traits of leaves and fruits were assessed using descriptors proposed by IPGRI, UPOV, and Barrientos-Priego et al. (2010). In addition, fruit dry matter and oil content were determined. Data were analyzed using principal component analysis, analysis of variance, Tukey's test ($\alpha = 0.05$), Pearson's correlation, and simple linear regression. Principal component analysis explained 48.6% of the total variation and showed that dry matter percentage, oil content, and peel thickness were the variables that contributed most to the differentiation among selections. Selection AHS2 exhibited the highest dry matter and oil content, whereas AHS4 showed the lowest values. Furthermore, a strong positive and highly significant correlation was observed between dry matter and oil content ($r = 0.8656$; $R^2 = 0.7493$). The evaluated selections exhibited morphological and physicochemical variation, providing valuable information for the identification and selection of elite 'Hass' avocado materials with fruit quality attributes of commercial interest and potential for breeding programs.

Key words: *Persea americana*; morphological traits; dry matter; oil content; fruit quality.

Introducción

El aguacate (*Persea americana* Mill.) es uno de los frutales de mayor importancia económica a nivel mundial debido al incremento sostenido de su producción, comercialización y consumo, impulsado por la creciente demanda de alimentos con alto valor nutricional y funcional. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la producción mundial de aguacate superó los 10.4 millones de toneladas en 2023, mientras que México se consolidó como el principal productor mundial con aproximadamente 2.97 millones de toneladas, equivalentes a cerca del 28 % de la producción global. A nivel nacional, el estado de Michoacán continúa siendo la principal región productora, al aportar aproximadamente el 75 % de la producción nacional, lo que lo convierte en el principal proveedor de aguacate 'Hass' para los mercados de exportación (FAOSTAT, 2025; SIAP, 2024). Esta relevancia económica posiciona al cultivo como uno

de los sistemas frutícolas de mayor impacto para la agricultura mexicana y una importante fuente de generación de divisas, empleo y desarrollo regional.

Además de su importancia económica, el aguacate es ampliamente reconocido por su elevado valor nutricional y sus propiedades funcionales. La pulpa del fruto contiene alta proporción de ácidos grasos monoinsaturados, principalmente ácido oleico, así como fibra dietética, vitaminas (E, K, C y complejo B), minerales, fitoesteroles, carotenoides y compuestos fenólicos con actividad antioxidante. La presencia de estos compuestos confiere al aguacate un elevado valor nutricional y funcional, características que han incrementado el interés de consumidores, productores e industria alimentaria por este fruto, favoreciendo su creciente demanda en los mercados nacionales e internacionales (Dreher et al., 2021; James-Martin et al., 2024).

Estas características, aunadas a las crecientes exigencias del mercado nacional e internacional, han incrementado el interés por identificar materiales que, además de mantener una alta productividad, presenten atributos del fruto que satisfagan los estándares comerciales. Entre estos atributos destacan el contenido de materia seca y de aceite, los cuales son indicadores ampliamente utilizados para evaluar la madurez fisiológica, el comportamiento poscosecha y la calidad para la exportación (Lee, 1981; Carvalho et al., 2014).

El cultivar 'Hass' representa la variedad de mayor importancia comercial a nivel mundial debido a su excelente calidad organoléptica, elevado contenido de aceite, amplia aceptación por parte de los consumidores y buena capacidad de conservación durante la poscosecha. Sin embargo, esta variedad posee un origen clonal derivado de un número reducido de progenitores, lo que ha dado lugar a una limitada variabilidad genética entre los individuos propagados clonalmente de este cultivar (Ashworth & Clegg, 2003; Chen et al., 2009). Como consecuencia, la reducida variabilidad observada dentro del cultivar incrementa el interés por identificar árboles que presenten diferencias fenotípicas sobresalientes, las cuales pueden constituir materiales de interés para programas de selección y evaluación agronómica.

En este contexto, la identificación de variantes fenotípicas presentes en huertos comerciales representa una alternativa para ampliar la disponibilidad de materiales con características de interés agronómico. Para determinar su potencial, es necesario realizar una evaluación integral que incluya atributos morfológicos y de calidad del fruto.

La evaluación de atributos morfológicos constituye una herramienta útil para identificar materiales con características agronómicas sobresalientes mediante el uso de descriptores estandarizados, facilitando su descripción varietal, la protección de nuevas selecciones y la conservación de los recursos fitogenéticos (IPGRI, 1995; UPOV, 2017; Barrientos-Priego et

al., 2010). De manera complementaria, la evaluación de materia seca y el contenido de aceite proporciona información sobre la calidad comercial, la madurez fisiológica y el comportamiento poscosecha de los materiales evaluados, fortaleciendo los criterios para su incorporación a programas de mejoramiento genético.

En diversas regiones productoras de Michoacán se han identificado de forma empírica árboles de aguacate 'Hass' que presentan diferencias morfológicas respecto al cultivar convencional. Sin embargo, estas variantes no han sido descritas ni evaluadas de manera sistemática. Esta falta de información científica limita su aprovechamiento y su posible incorporación a estrategias de selección y conservación de germoplasma.

Bajo este escenario, se plantea que selecciones de aguacate 'Hass' provenientes de huertos comerciales de Michoacán presentan diferencias morfológicas y fisicoquímicas del fruto, lo que evidencia la existencia de materiales con características agronómicas sobresalientes para su evaluación y selección.

El objetivo del presente estudio fue evaluar los atributos morfológicos y la calidad del fruto mediante la determinación del contenido de materia seca y aceite en selecciones de aguacate 'Hass' provenientes de huertos comerciales de Michoacán, México, con el propósito de identificar materiales con potencial para programas de selección y mejoramiento genético.

Materiales y métodos

El estudio se realizó durante el periodo 2025 y 2026 en huertos comerciales de aguacate 'Hass' ubicados en los municipios de Tancítaro y Ziracuaretiro, Michoacán, México. El municipio de Tancítaro se localiza a 19° 18′ 04″ N y 102° 19′ 06″ O, a una altitud de 2,086 m.s.n.m., presenta un clima semicálido subhúmedo y temperatura promedio entre 8 y 26 °C. En este sitio se evaluó el testigo 'Hass' (AHTT) y la selección AHS1. El municipio de Ziracuaretiro se localiza a 19° 25′ 00″ N y 101° 54′ 37″ O, a 1,380 m s.n.m., con clima cálido subhúmedo y temperaturas entre 18 y 26 °C.

Se evaluaron seis materiales de aguacate 'Hass', correspondientes a dos testigos comerciales (AHTT y AHTZ) y cuatro selecciones (AHS1, AHS2, AHS3 y AHS4) previamente identificadas en huertos comerciales de los municipios de Tancítaro y Ziracuaretiro, Michoacán. Para cada material se seleccionaron cinco árboles representativos de cada una de las selecciones, considerando su uniformidad fenotípica y estado fitosanitario; cada árbol constituyó la unidad experimental, para un total de 30 árboles. El manejo de los árboles en los huertos se realiza con prácticas convencionales utilizadas en la región e incluyen fertilización, poda, control fitosanitario y demás labores agronómicas.

Con el propósito de estandarizar el muestreo, cada árbol se dividió en cuatro cuadrantes y las muestras se obtuvieron del cuadrante sureste. En cada árbol se evaluaron cinco hojas completamente desarrolladas y cinco frutos en madurez fisiológica.

La caracterización se realizó mediante descriptores cuantitativos propuestos por el Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos (IPGRI, 1995), la Unión Internacional para la Protección de las Obtenciones Vegetales (UPOV, 2017) y el Manual gráfico para la descripción varietal del aguacate de Barrientos-Priego et al. (2010). Se analizaron las variables longitud y ancho de hoja, relación longitud/ancho de la hoja, peso, longitud y diámetro del fruto, longitud de la semilla y espesor de la cáscara. Las mediciones se realizaron con un calibrador digital Uline®, modelo H-7352 (Pleasant Prairie, Wisconsin, EE. UU.). El peso del fruto se determinó mediante una báscula digital de precisión Truper®, modelo BASE-3 (Ciudad de México, México).

Para la determinación del contenido de materia seca (%), fueron tomados cinco frutos por árbol, lo que totaliza 25 frutos de cada una de las selecciones. Los frutos se cosecharon cuando alcanzaron la etapa de madurez fisiológica; se les retiró la cáscara y la semilla para obtener la pulpa fresca, tomando una muestra aproximada de 11 g pesada en una balanza analítica VIBRA®, modelo HT-224R (Japón). Las muestras se colocaron en papel bond previamente identificadas y se sometieron a deshidratación en un horno de microondas Daewoo®, modelo DMDXX11S2 (Corea del Sur), con base en el método descrito por Lee (1981), con modificaciones consistentes en la deshidratación mediante ciclos sucesivos de potencia decreciente (P-100, P-70, P-50 y P-20) hasta alcanzar peso constante. El porcentaje de materia seca se calculó para cada fruto individual mediante la siguiente ecuación (1).

$$Materia\ seca\ (\%) = \left(\frac{Peso\ seco}{Peso\ fresco}\right) \times 100 \quad (1)$$

La misma pulpa seca obtenida durante la determinación de materia seca, se utilizó posteriormente para la cuantificación del contenido de aceite. Para este caso, se pesó una muestra aproximada de 2 g de pulpa seca, la cual fue colocada en cartuchos de celulosa y sometida a extracción mediante el método Soxhlet, de acuerdo con AOAC (1980), con modificaciones al procedimiento descrito por Lee (1981). La extracción se llevó a cabo mediante un sistema de destilación continua acoplado a una unidad de calentamiento séxtuple de posiciones independientes (Felisa®, modelo FE-361, Guadalajara, México), utilizando un aparato extractor de borosilicato (Pyrex®, Corning Inc., Nueva York, EE. UU.). Como solvente se emplearon 150 mL de hexano ACS (Meyer®, México) en matraces balón Kimax® de 250 mL, durante 2 h de reflujo continuo. Al finalizar la extracción, el solvente se eliminó

por evaporación y el aceite recuperado se cuantificó gravimétricamente. Con el fin de expresar el contenido de aceite en base al peso fresco del fruto utilizando la ecuación (2).

$$Contenido\ de\ aceite\ (\%p/p) = \frac{Materia\ seca\ (\%) \times Peso\ del\ aceite\ extraido\ (g)}{Peso\ de\ la\ pulpa\ seca\ (g)} \quad (2)$$

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar (DCA), con seis tratamientos correspondientes a los materiales AHTT, AHTZ, AHS1, AHS2, AHS3 y AHS4. Los datos obtenidos de la caracterización morfológica, materia seca y contenido de aceite se analizaron mediante el programa R versión 4.6.0 (R Core Team, 2025). Previamente, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk y de homogeneidad de varianzas. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y, cuando se detectaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$), las medias se compararon mediante la prueba de Tukey (α=0.05). Con el propósito de explorar la variabilidad multivariada y la asociación entre las variables evaluadas, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) utilizando las variables cuantitativas estandarizadas. Asimismo, la relación entre el contenido de materia seca y el contenido de aceite se evaluó mediante el coeficiente de correlación de Pearson y un análisis de regresión lineal simple. Los resultados se expresan como media ± error estándar.

Resultados y discusión

El análisis de componentes principales (ACP) explicó el 48.6 % de la variación total; el primer componente (CP1) explicó el 27.6 % y el segundo componente (CP2) el 21.0 %. La materia seca y el contenido de aceite mostraron una asociación positiva, al orientarse en la misma dirección sobre el CP1. El espesor de la cáscara presentó un comportamiento similar, mientras que el peso y el diámetro del fruto se asociaron positivamente entre sí. En contraste, la longitud de la semilla presentó una orientación opuesta, lo que sugiere un patrón de variación diferente respecto a las variables relacionadas con la calidad del fruto (Figura 1).

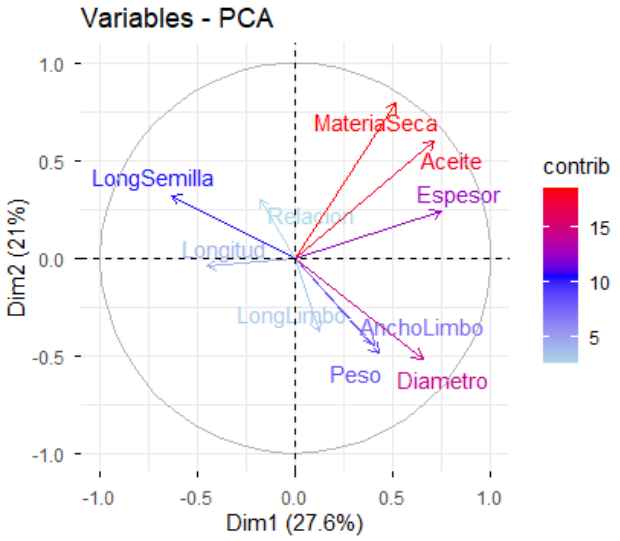


Figura 1. Círculo de correlaciones del análisis de componentes principales (ACP). La longitud y dirección de los vectores indican la contribución y asociación de las variables con los dos primeros componentes principales.

La asociación observada entre la materia seca y el contenido de aceite coincide con lo reportado para aguacate, donde ambos atributos aumentan conforme avanza la maduración fisiológica del fruto y constituyen indicadores importantes de calidad (Lee, 1981; Lee et al., 1983; Carvalho et al., 2014). En concordancia con lo anterior, los resultados del presente estudio indican que estas variables fisicoquímicas contribuyeron de manera importante a la variación observada entre las selecciones evaluadas.

La representación de las selecciones en el plano definido por los dos primeros componentes principales mostró similitud entre varios materiales; sin embargo, también permitió identificar tendencias de agrupamiento que evidencian variabilidad fenotípica entre las selecciones evaluadas (Figura 2).

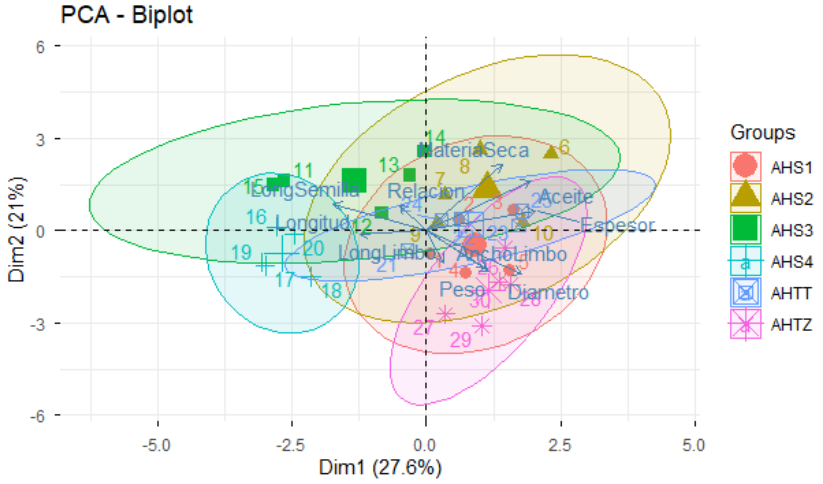


Figura 2. Biplot del análisis de componentes principales (ACP). Los puntos representan las observaciones individuales y las elipses indican el agrupamiento de cada selección.

La distribución observada en el ACP indica que las variables evaluadas permitieron diferenciar parcialmente las selecciones, destacando la contribución de la materia seca, el contenido de aceite y el espesor de la cáscara en la separación de los materiales. El empleo del ACP ha demostrado ser una herramienta útil para resumir la variabilidad presente en colecciones de aguacate e identificar asociaciones entre variables relacionadas con la calidad del fruto (Barrientos-Priego et al., 2010; López-Guzmán et al., 2015).

El contenido de materia seca presentó diferencias significativas entre las selecciones ($F = 6.447$; $P = 0.000625$). La selección AHS2 registró el mayor contenido de materia seca, mientras que AHTZ y AHS4 presentaron los valores más bajos. Las selecciones AHTT, AHS1 y AHS3 mostraron valores intermedios, sin diferencia estadística con AHS2 (Figura 3).

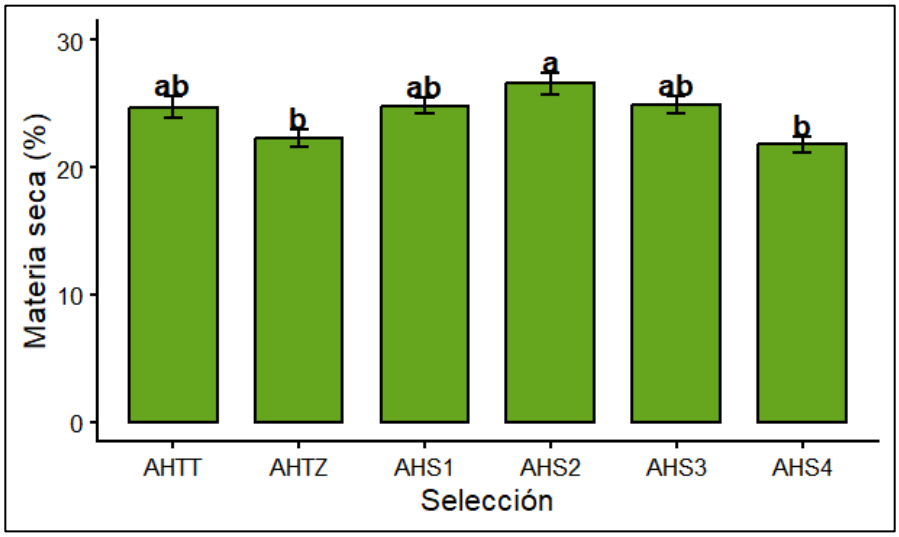


Figura 3. Contenido de materia seca (%). Las barras representan la media ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre selecciones, según Tukey ($P \leq 0.05$).

La materia seca constituye uno de los principales indicadores de madurez fisiológica y calidad del aguacate, esto debido a su estrecha relación con la acumulación de aceite en el mesocarpio (Lee et al., 1983; Carvalho et al., 2014). Las diferencias observadas entre selecciones indican variación en la acumulación de reservas durante el desarrollo del fruto, lo que representa un atributo de interés para la selección de materiales con mejor calidad.

El contenido de aceite presentó diferencias significativas entre las selecciones ($F = 10.85$; $P = 1.52 \times 10^{-5}$). La selección AHS2 registró el mayor contenido de aceite, mientras que AHS4 presentó el menor valor. Las selecciones AHTT, AHTZ, AHS1 y AHS3 mostraron valores intermedios (Figura 4).

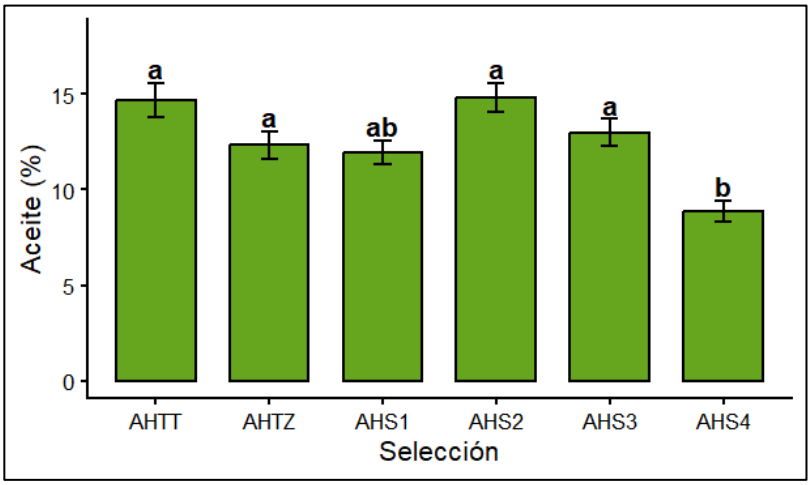


Figura 4. Contenido de aceite (%). Las barras representan la media ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre selecciones de acuerdo con Tukey ($P \leq 0.05$).

El contenido de aceite es uno de los principales atributos que determinan la calidad del fruto de aguacate debido a su contribución a las características nutrimentales y sensoriales (Dreher et al., 2021; James-Martin et al., 2024). Las diferencias observadas entre las selecciones evaluadas evidencian variabilidad en este atributo, lo que representa una característica de interés para la identificación de materiales con potencial comercial (Lee et al., 1983; Carvalho et al., 2014).

El contenido de materia seca presentó una correlación positiva y altamente significativa con el contenido de aceite ($r = 0.8656$; $P < 0.001$). En la figura 5 el modelo de regresión lineal indicó que la materia seca explicó el 74.93 % de la variación observada en el contenido de aceite ($R^2 = 0.7493$).

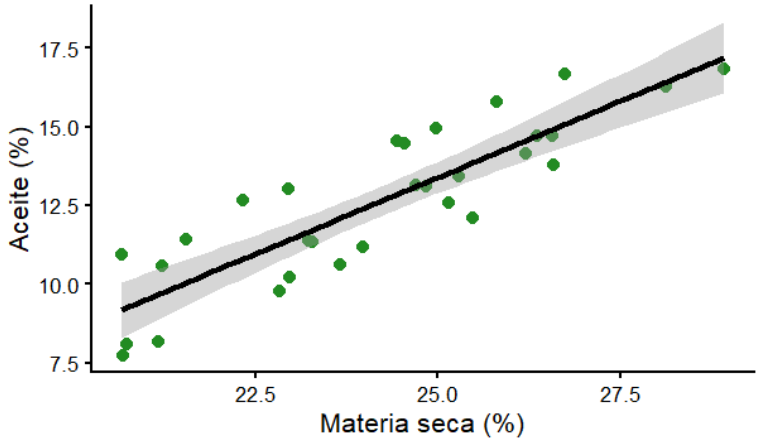


Figura 5. Relación entre el contenido de materia seca (%) y el contenido de aceite (%). La línea representa el ajuste del modelo de regresión lineal y la banda sombreada el intervalo de confianza al 95 %.

La elevada correlación observada confirma que el porcentaje de materia seca constituye un indicador confiable del contenido de aceite en el fruto de aguacate, resultado que coincide con lo reportado por Lee (1981), Lee et al. (1983) y Carvalho et al. (2014). Estos resultados respaldan el uso de la materia seca como un criterio para estimar indirectamente el contenido de aceite en la evaluación de selecciones de aguacate.

Conclusiones

Las selecciones de aguacate 'Hass' evaluadas presentaron variación en los atributos morfológicos y fisicoquímicos del fruto. La asociación positiva entre el porcentaje de materia seca y el contenido de aceite confirma la utilidad de la materia seca como un indicador confiable de la calidad del fruto. En conjunto, los resultados obtenidos contribuyen a la identificación de materiales con atributos de interés agronómico y proporcionan información útil para programas de selección y mejoramiento genético.

Literatura citada

Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (2023). *Official methods of analysis of AOAC INTERNATIONAL* (22nd ed.). Rockville, Maryland, Estados Unidos. AOAC INTERNATIONAL. https://doi.org/10.1093/9780197610145.001.0001

Ashworth, V. E. T. M., & Clegg, M. T. (2003). Microsatellite markers in avocado (*Persea americana* Mill.): Genealogical relationships among cultivated avocado genotypes. *Journal of Heredity*, 94 (5), 407–415. https://doi.org/10.1093/jhered/esg076

Barrientos-Priego, A. F., Borys, M. W., Ben-Ya'acov, A., & de la Cruz-Torres, E. (2010). *Manual gráfico para la descripción varietal del aguacate (Persea americana Mill.)*. Chapingo, México. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS), Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

Carvalho, C. P., Velásquez, M. A., & Van Rooyen, Z. (2014). Determination of the minimum dry matter index for the optimum harvest of 'Hass' avocado fruits in Colombia. *Agronomía Colombiana*, 32 (3), 399–406. https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v32n3.46031

Chen, H., Morrell, P. L., Ashworth, V. E. T. M., de la Cruz, M., & Clegg, M. T. (2009). Tracing the geographic origins of major avocado cultivars. *Journal of Heredity*, 100 (1), 56–65. https://doi.org/10.1093/jhered/esn068

Dreher, M. L., Cheng, F. W., & Ford, N. A. (2021). A comprehensive review of Hass avocado clinical trials, observational studies, and biological mechanisms. *Nutrients*, 13 (12), 4376. https://doi.org/10.3390/nu13124376

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2025). *FAOSTAT: Crops and livestock products*. FAOSTAT. [En línea]. Roma, Italia. Disponible en: https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL [Consulta: 27 de julio de 2026].

International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI). (1995). *Descriptors for avocado (Persea americana Mill.)*. Roma, Italia. International Plant Genetic Resources Institute. Disponible en: https://www.bioversityinternational.org/e-

library/publications/detail/descriptors-for-avocado-persea-spp/ [Consulta: 25 de julio de 2026].

James-Martin, G., Brooker, P. G., Hendrie, G. A., & Stonehouse, W. (2024). Avocado consumption and cardiometabolic health: A systematic review and meta-analysis. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 124 (2), 233–248.e4. https://doi.org/10.1016/j.jand.2022.12.008

Lee, S. K. (1981). Methods for determining avocado maturity. *California Avocado Society Yearbook*, 65, 134–135. Disponible en: https://www.avocadosource.com/CAS_Yearbooks/CAS_65_1981/CAS_1981_PG_134-135.pdf

Lee, S. K., Young, R. E., Schiffman, P. M., & Coggins, C. W. (1983). Maturity studies of avocado fruit based on picking dates and dry weight. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 108 (3), 390–394. Disponible en: https://journals.ashs.org/jashs

López-Guzmán, G. G., Medina-Torres, R., Guillén-Andrade, H., Ramírez-Gil, J. G., Aguilar-Castillo, J. A., & Valdivia-Bernal, R. (2015). Caracterización morfológica en genotipos nativos de aguacate (*Persea americana* Mill.) de clima tropical en Nayarit, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6 (9), 2157–2169. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342015000902157

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2024). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. [En línea]. Ciudad de México, México. Disponible en: https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/ [Consulta: 23 de julio de 2026].

Union for the Protection of New Varieties of Plants (UPOV). (2017). *Avocado (Persea americana Mill.): Guidelines for the Conduct of Tests for Distinctness, Uniformity and Stability (TG/97/4 Rev.)*. Ginebra, Suiza. UPOV. Disponible en: https://www.upov.int/edocs/tgdocs/en/tg097.pdf [Consulta: 21 de julio de 2026].

Evaluación para su uso agrícola y alimenticio de germoplasma de dos especies de *Jaltomata* del centro de México

Ignacio Darío Flores-Sánchez[59] y Manuel Sandoval-Villa[60]

Resumen

El género *Jaltomata*, con origen en el continente americano, se conforma de 76 especies distribuidas en dos centros de diversidad. México, se considera el segundo centro con 8 especies reportadas, después de Perú, con 68 especies. Dentro de estas, se encuentran *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala*, nativas del país, semidomesticadas, de uso alimenticio y con importante contenido nutrimental y de compuestos benéficos para la salud humana. Pertenecen al grupo de plantas abandonadas o subutilizadas, importantes para diversificar la disponibilidad de alimentos que contribuyan a solucionar el problema de malnutrición que se presenta en la sociedad. Investigaciones recientes reportan su potencial para su estudio en ambientes controlados de producción agrícola, por lo tanto, con fines de mejoramiento o uso directo, es importante evaluar materiales de diferentes orígenes. El objetivo del trabajo fue evaluar en campo, en entidades federativas del centro del país, características de interés agronómico en material vegetal y recolectar germoplasma de ambas especies. Se generaron 7 mapas de distribución de las especies y se obtuvieron 21 recolectas de germoplasma de *Jaltomata procumbens* y una de *Jaltomata tlaxcala*, en los estados de Hidalgo, México, Puebla y Tlaxcala. Se observó variabilidad en características de interés agronómico como altura de planta, diámetro de tallo, frutos por racimo, y en largo y ancho de fruto.

Palabras clave: Jaltomate, *Jaltomata procumbens*, *Jaltomata tlaxcala*, especies subutilizadas, aprovechamiento agrícola.

Abstract

The *Jaltomata* genus, native to American continent, is made up of 76 species distributed in two diversity centers. Mexico is considered the second center with 8 species reported, after Peru with 68 species. Among these are *Jaltomata procumbens* and *Jaltomata tlaxcala*, native to the country, semi-domesticated, for food use and with important nutritional content and

[59] Postgrado en Edafología, Colegio de Postgraduados, carretera México-Texcoco, km 36.5, Montecillo, Texcoco 56264, México; msandoval@colpos.mx
[60] Autor de correspondencia: flores.ignacio@colpos.mx; Tel.: 551-077-6669

beneficial compounds for human health. They belong to the group of underutilized or abandoned plants, relevant for diversifying the availability of food that contributes to solving the malnutrition problems that occurs in society. Recent works report their potential for study in controlled environment of agricultural production, therefore, for improvement or direct use purposes it is important to evaluate materials from different origins. The objective of this research was to evaluate, in states in the center of the country, characteristics of agronomic interest in plant material and collect germoplasm of both species. Seven distribution maps of the species were generated, and 21 germoplasm collections of *Jaltomata procumbens* and one of *Jaltomata tlaxcala* were obtained, in the states of Hidalgo, Mexico, Puebla, and Tlaxcala. Variability in characteristics of agronomic interest was observed such as plant height, stem diameter, fruits per cluster, length and width of the fruit.

Keywords: Jaltomate, *Jaltomata procumbens*, *Jaltomata tlaxcala*, underutilized species, agricultural use.

Introducción

El género *Jaltomata* (Solanaceae), con origen en el continente americano, está conformado por 76 especies distribuidas desde Sudamérica hasta la parte sur de los Estados Unidos. Tiene dos centros de diversidad, Perú y México, con 68 y 8 especies, respectivamente (T. Mione, comunicación personal, 15 de octubre de 2024; Mione *et al*., 2015). En México, se encuentran dos especies semidomesticadas de uso alimenticio, nativas del país y vinculadas a sistemas tradicionales de producción. La primera, *Jaltomata procumbens*, es la más ampliamente distribuida, tiene un hábito de crecimiento erecto y color de fruto azul-negruzco (Flores-Sánchez *et al*., 2021), la segunda, *Jaltomata tlaxcala*, restringida a áreas específicas del país, tiene hábito de crecimiento decumbente y fruto color verde en estado maduro (Flores-Sánchez *et al*., 2024).

Estás especies están dentro del grupo de plantas subutilizadas o abandonas, que se caracterizan por ser especies silvestres, semidomesticadas o domesticadas (Padulosi *et al*., 2013), por haber sido aprovechadas a través de la recolecta, cultivo incipiente o auspicio, estar vinculadas a sistemas de producción tradicionales, adaptadas a condiciones climáticas y de suelo heterogéneas y desfavorables, y por ser más resistentes a plagas y enfermedades locales (Padulosi *et al*., 2013; Dansi *et al*., 2012). También, comparten el problema de que sus poblaciones están reducidas, por lo que se consideran en riesgo de desaparecer junto con el conocimiento tradicional vinculado a ellas, principalmente *Jaltomata tlaxcala*, que sólo se reporta su presencia dentro de sitios de cultivo (Williams, 1985; Flores-Sánchez *et al*., 2021).

Entre los factores que las afectan se encuentran: el uso de herbicidas, la falta de información sobre su valor alimenticio, que ha llevado al poco interés en su conservación y aprovechamiento, y al enfoque en la producción de las principales especies que las marginalizan en los centros de investigación, al no estar dentro de cultivos básicos (Padulosi *et al*., 2013; Nixwell *et al*., 2022).

Sin embargo, en tiempos recientes, el interés para el estudio de dichos recursos va en aumento, sobre todo, ante la problemática de malnutrición reportada en la sociedad, vinculada, entre otros factores, a la reducida diversidad de alimentos disponibles en el sistema de producción de alimentos en todos sus niveles, por lo que se plantea como una alternativa de solución el estudio, evaluación y aprovechamiento de la biodiversidad de especies subutilizadas o abandonadas (WHO, 2020).

Las especies, *J. procumbens* y *J. tlaxcala*, se evaluaron bajo condiciones de cultivo y se concluyó que ambas tienen el potencial para ser consideradas en estudios en ambientes controlados para su aprovechamiento con fines agrícolas y alimenticios (Flores-Sánchez *et al*., 2021). Se reportaron datos sobre contenido nutrimental en frutos (Mera-Ovando *et al*., 2003), características de importancia agronómica (Flores-Sánchez *et al*., 2021), germinación de la semilla (Flores-Sánchez *et al*., 2022), fenología (Flores-Sánchez, 2022), contenido de metabolitos secundarios, componentes benéficos para la salud humana (Flores-Sánchez *et al*., 2023) y absorción nutrimental (Flores-Sánchez *et al*., 2025).

Un aspecto importante cuando se trabaja con este tipo de recursos es la variabilidad que se puede encontrar en las diferentes características que se estudian, como lo reportado en los estudios realizados en ambas especies. Esta variabilidad es importante porque permite identificar genotipos sobresalientes para su aprovechamiento directo o para llevar a cabo un proceso de mejoramiento genético, y continuar con su domesticación. Por lo tanto, es importante evaluar la variabilidad en materiales de diferentes orígenes, sobre todo, en especies que presentan una amplia distribución como *J. procumbens*.

Por lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo llevar a cabo la búsqueda, evaluación de material vegetal en campo y recolecta de frutos de *J. procumbens* y *J. tlaxcala*, en las entidades federativas del centro del país, bajo la siguiente hipótesis: debido a la distribución de las especies en diferentes condiciones ambientales de México, es posible encontrar germoplasma con una variabilidad en características de interés agronómico, para ser utilizada en el mejoramiento de ambas especies.

Materiales y métodos

Se consultó información del Herbario-Hortorio del Colegio de Postgraduados (CHAPA), del Herbario-Hortorio de la Universidad Autónoma Chapingo (CHAP) y del Herbario Nacional de México (MEXU), de la Universidad Nacional Autónoma de México. Se generaron mapas de entidades del centro de México donde se ha reportado la presencia de las especies *J. procumbens* y *J. tlaxcala*, con base en información del periodo 1929-2023. Se determinaron los sitios para realizar las recolectas de frutos, dando prioridad a aquellos lugares donde se reportó la presencia de ambas especies en áreas de cultivo o con uso alimenticio. Se tomó registro en campo de las variables: altura de planta, diámetro de tallo, número de frutos por racimo, largo y ancho de fruto, número de semillas por fruto y, largo y ancho de semilla. De los frutos recolectados en estado maduro se extrajo la semilla, se lavó y secó a temperatura ambiente (20 °C), y se almacenó en bolsas de papel de 0.25 kg de capacidad en condiciones de refrigeración a 4 °C.

Resultados y discusión

Distribución de Jaltomata procumbens y Jaltomata tlaxcala en la zona centro de México

Se generaron siete mapas de distribución de *J. procumbens* y *J. tlaxcala* con base en la información obtenida de los herbarios CHAP, CHAPA y MEXU. Los mapas corresponden a las entidades federativas de la Ciudad de México (Figura 1) y a los estados de México (Figura 2), Hidalgo (Figura 3), Morelos (Figura 4), Puebla (Figura 5), Querétaro (Figura 6) y Tlaxcala (Figura 7).



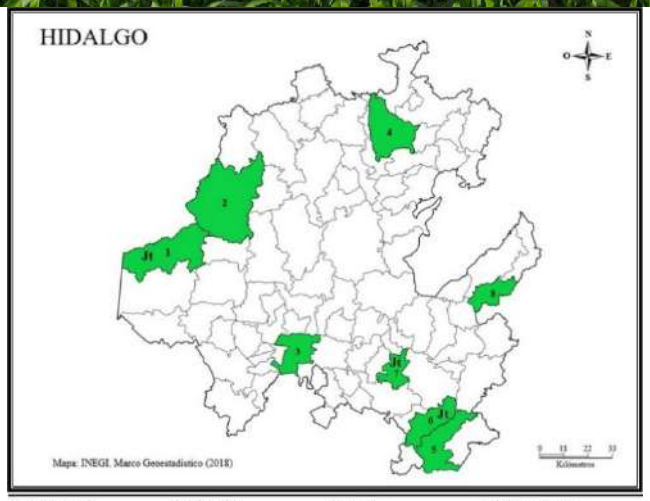
1. Tlalpan
2. Álvaro Obregón
3. Miguel Hidalgo
4. Coyoacán
5. Xochimilco
6. Milpa Alta
7. Iztapalapa

Figura 1. Mapa de distribución de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala* en la Ciudad de México, elaborado con base en información del período 1929-2023, obtenida de los herbarios del Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo y Universidad Nacional Autónoma de México. Abreviatura: Jt = indica también la presencia de *Jaltomata tlaxcala*.



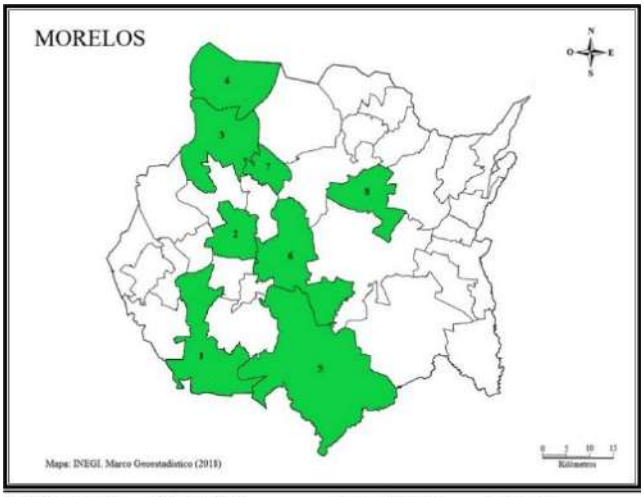
1. Tlatlaya	7. Temascalcingo	13. Huehuetoca	19. Acolman
2. Amatepec	8. Coatepec Harinas	14. Temamatla	20. Teotihuacán
3. Temascaltepec	9. Temoaya	15. Cocotitlán	21. Villa Victoria
4. Valle de Bravo	10. Zumpahuacán	16. Ixtapaluca	
5. Donato Guerra	11. Ocuilán	17. Texcoco	
6. Villa de allende	12. Naucalpan	18. Tepetlaoxtoc	

Figura 2. Mapa de distribución de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala* en el estado de México, elaborado con base en información del período 1929-2023, obtenida de los herbarios del Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo y Universidad Nacional Autónoma de México. Abreviatura: Jt = indica también la presencia de *Jaltomata tlaxcala*.



1. Tecozautla
2. Zimapán
3. Ajacuba
4. Tlanchinol
5. Apan
6. Tepeapulco
7. Epazoyucan
8. Tenango de Doria

Figura 3. Mapa de distribución de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala* en el estado de Hidalgo, elaborado con base en información del período 1929-2023, obtenida de los herbarios del Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo y Universidad Nacional Autónoma de México. Abreviatura: Jt = indica también la presencia de *Jaltomata tlaxcala*.



1. Puente de Ixtla
2. Xochitepec
3. Cuernavaca
4. Huitzilac
5. Tlaquiltenango
6. Tlaltizapán
7. Jiutepec
8. Cuautla

Figura 4. Mapa de distribución de la especie *Jaltomata procumbens* en el estado de Morelos, elaborado con base en información del período 1929-2023, obtenida de los herbarios del

Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo y de la Universidad Nacional Autónoma de México.

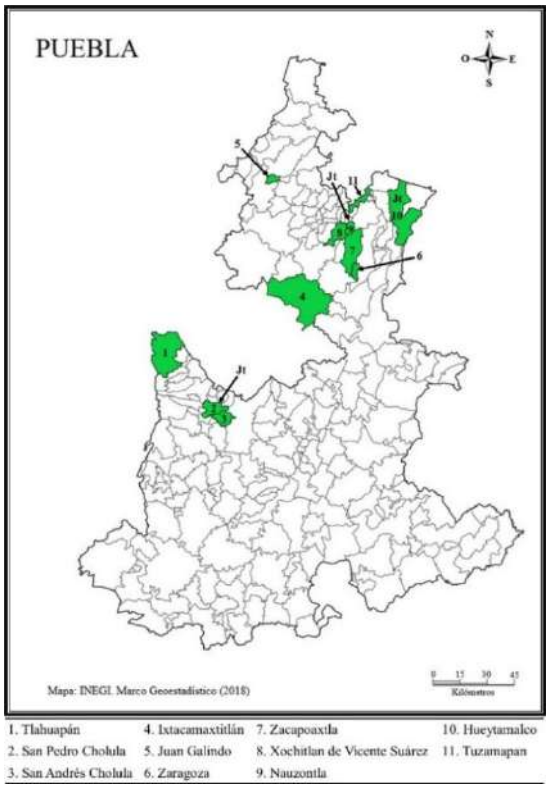


Figura 5. Mapa de distribución de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala* en el estado de Puebla, elaborado con base en información del período 1929-2023, obtenida de los herbarios del Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo y Universidad Nacional Autónoma de México. Abreviatura: Jt = indica también la presencia de *Jaltomata tlaxcala*.

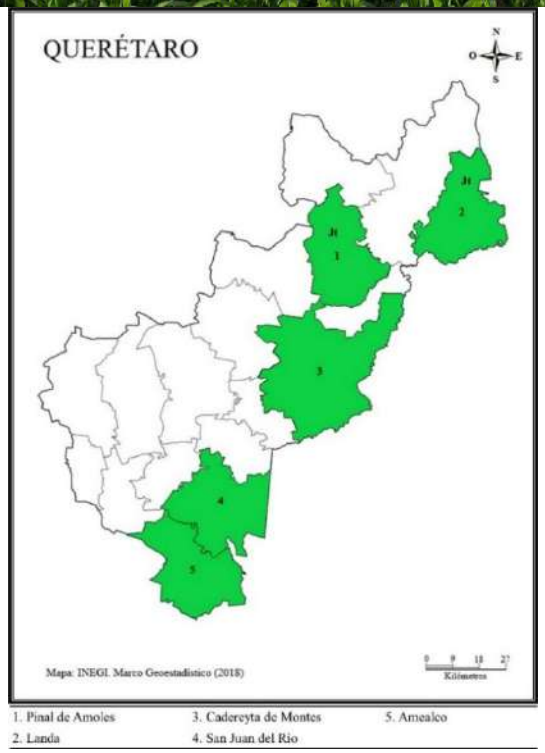
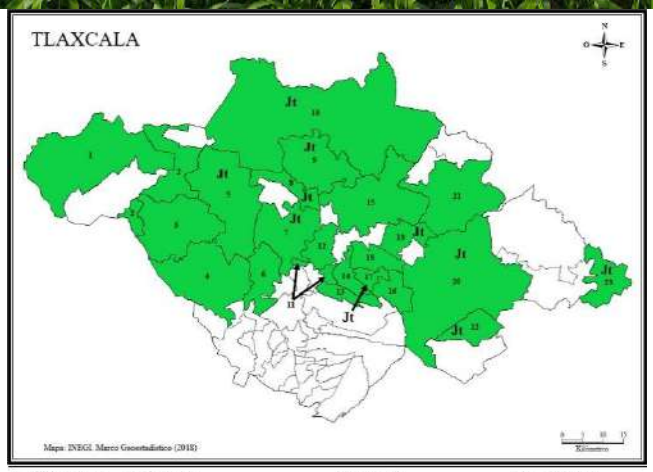


Figura 6. Mapa de distribución de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala* en el estado de Querétaro, elaborado con base en información del período 1929-2023, obtenida de los herbarios del Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo y Universidad Nacional Autónoma de México. Abreviatura: Jt = indica también la presencia de *Jaltomata tlaxcala*.



1. Calpulalpan	7. Xaltocan	13. Contla	19. Xalostoc
2. Sanctorum	8. Muñoz de Domingo Arenas	14. Santa Cruz Tlaxcala	20. Huamantla
3. Españita	9. Atlangatepec	15. Tetla	21. Terrenate
4. Ixtacuixtla	10. Tlaxco	16. San José Teacalco	22. Ixtenco
5. Hueyotlipan	11. Amaxac	17. Coaxomulco	23. Tequexquitla
6. Panotla	12. Yauhquemecan	18. Tzompantepec	

Figura 7. Mapa de distribución de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala* en el estado de Tlaxcala, elaborado con base en información del período 1929-2023, obtenida de los herbarios del Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo y Universidad Nacional Autónoma de México. Abreviatura: Jt = indica también la presencia de *Jaltomata tlaxcala*.

Áreas seleccionadas para recolecta de frutos

Entre los criterios de selección estuvieron la presencia de la planta dentro o en las orillas de terrenos de cultivo, en huertos familiares o patios de casas, evidencias de prácticas de auspicio, uso de los frutos y brotes con fines alimenticios, o uso de la planta con fines forrajeros (Cuadro 1).

Cuadro 1. Criterios de selección utilizados para realizar la recolecta de frutos de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala* en los estados de México, Hidalgo, Morelos, Puebla, Querétaro y Tlaxcala.

Entidad federativa	Criterios de selección
México	Plantas creciendo en huerto de nopales, entre terrenos de cultivo de maíz, cebada o haba, o en las orillas de parcela, frutos y hojas tiernas con uso comestible, frutos negros en estado maduro.

Hidalgo	Plantas creciendo en los bordes de cultivo de cebada, lugares húmedos, frutos comestibles.
Morelos	Frutos con uso alimenticio.
Puebla	Plantas creciendo en huerto familiar, milpa o en las orillas de parcelas, frutos y hojas con uso comestible, frutos negros y verdes en estado maduro, planta usada como forraje.
Querétaro	Planta con frutos comestibles, negros en estado maduro.
Tlaxcala	Plantas creciendo dentro u orillas de cultivo de maíz-haba, maíz o haba, en las orillas de cultivo de cebada o alfalfa, creciendo sola en el borde de parcela o entre magueyes, en huerto familiar o patio de casa, con reporte de ser auspiciadas y utilizadas con fines alimenticios, plantas con frutos negros o verdes en estado maduro.

Los sitios seleccionados fueron 7 municipios de México, 2 municipios de Hidalgo, 1 municipio de Morelos y Querétaro, 6 de Puebla y 16 municipios de Tlaxcala (Cuadro 2). De la Ciudad de México, con base en los criterios mencionados, no se seleccionó ningún sitio.

Cuadro 2. Municipios seleccionados para realizar la recolecta de frutos de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala*, en los estados de: México, Hidalgo, Morelos, Puebla, Querétaro y Tlaxcala.

Entidad federativa	Municipios seleccionados
México	Ixtapaluca (16), Naucalpan (12), Temoaya (9), Tepetlaoxtoc (18), Texcoco (17), Tlatlaya (1) y Villa Victoria (21).
Hidalgo	Ajacuba (3) y Apan (5).
Morelos	Xochitepec (2).
Puebla	Nauzontla (9), San Andrés Cholula (3), Tlahuapán (1), Tuzamapan (11), Xochitlán de Vicente Suárez (8) y Zacapoaxtla (7).
Querétaro	Pinal de Amoles (1).
Tlaxcala	Amaxac (11), Atlangatepec (09), Contla (13), Huamantla (20), Hueyotlipan (5), Ixtenco (22), Muñoz de Domingo Arenas (8), Santa Cruz Tlaxcala (14), San José Teacalco (16), Tequexquitla (23), Tetla (15), Terrenate (21), Tlaxco (10), Xalostoc (19), Xaltocan (7), Yauhquemecan (12).

Números entre paréntesis corresponden al número de identificación del municipio en el mapa de cada entidad federativa.

Frutos de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala* recolectados

De los sitios seleccionados por cada entidad federativa se realizó la recolecta de frutos en los municipios de Ajacuba (Hidalgo), Tlahuapan (Puebla), y Tequexquitla (Tlaxcala). En los demás municipios no fue posible realizar la búsqueda o no se encontró la planta. Adicional a los municipios mencionados, se llevó a cabo en sitios no registrados en materiales de herbario: Nanacamilpa, Tlaxcala; San Felipe del Progreso y Atlacomulco, México; Tezontepec, Hidalgo; Libres, Puebla. Se recolectaron 22 materiales, de los cuales 21 corresponden a *J. procumbens* y uno a *J. tlaxcala*. Los frutos recolectados se ubicaron en tres ambientes: medio silvestre (MS), orillas o dentro de terrenos de cultivo de temporal, de maíz o árboles frutales (TC), y en jardineras dentro de viviendas (Vi) con 4, 11 y 7 materiales recolectados por sitio, respectivamente, en un intervalo de altitud de 2335 a 2780 m.

Características de planta, fruto y semilla

Altura de planta

Se registró un valor promedio en altura de planta de 93.47 cm, altura máxima de 144 cm en el material T-Jp3-Vi, ubicado en Vi, y altura mínima de 42.3 cm en T-Jt-TC, ubicado dentro de TC de maíz, ambos ejemplares de Tlaxcala (Figura 8).

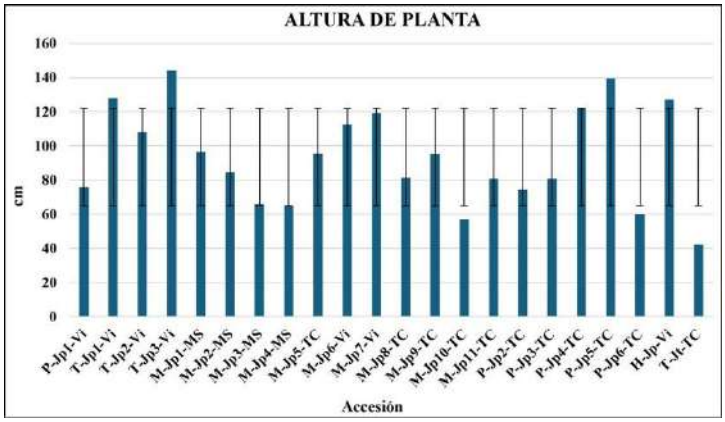


Figura 8. Altura de planta de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala*, de los estados de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala. Abreviaturas: H = Hidalgo, M = México, P = Puebla y T = Tlaxcala, Jp = *Jaltomata procumbens*, Jt = *Jaltomata tlaxcala*, MS = Medio silvestre, TC = Terreno de cultivo, Vi = Vivienda. Datos registrados en el periodo septiembre – noviembre de 2023.

Diámetro de tallo

Se registró un valor promedio de 1.20 cm, con un máximo de diámetro de tallo en P-Jp5- TC con 2.16 cm, ubicado dentro de terreno de cultivo de maíz, en Puebla, seguido de M-Jp7-Vi

con 2.04 cm, ubicado en vivienda, en México, y con el menor diámetro de tallo en T-Jt-TC con 0.74 cm, de Tlaxcala (Figura 9).

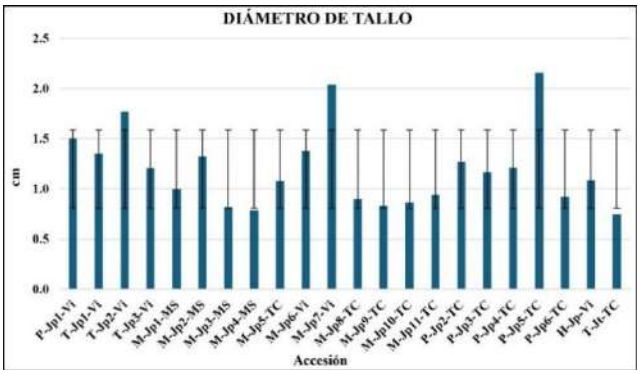


Figura 9. Diámetro de tallo de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala*, de los estados de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala. Abreviaturas: H = Hidalgo, M = México, P = Puebla y T = Tlaxcala, Jp = *Jaltomata procumbens*, Jt = *Jaltomata tlaxcala*, MS = Medio silvestre, TC = Terreno de cultivo, Vi = Vivienda. Datos registrados en el periodo septiembre – noviembre de 2023.

Número de frutos por racimo

El promedio encontrado fue de 3.28 frutos por planta. Las plantas que presentaron el mayor valor fueron P-Jp1-Vi con 5 frutos, ubicado dentro de vivienda, en el estado de Puebla, seguido de M-Jp7-Vi con 4.67 frutos, que también se ubicó dentro de vivienda, en México, y la de menor número de frutos se registró en T-Jt- TC con 1.67 frutos, en Tlaxcala (Figura 10).

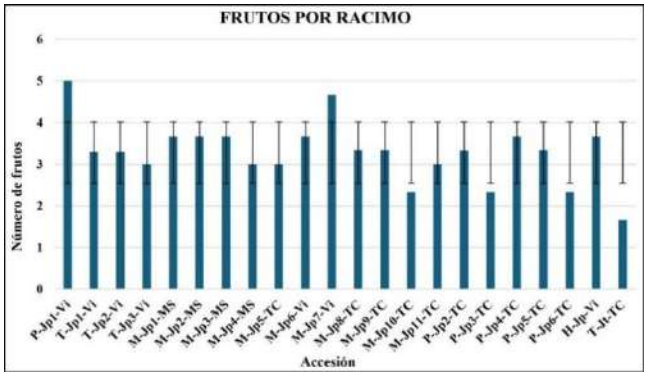


Figura 10. Número de frutos por racimo de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala*, de los estados de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala. Abreviaturas: H = Hidalgo, M = México,

P = Puebla y T = Tlaxcala, Jp = *Jaltomata procumbens*, Jt = *Jaltomata tlaxcala*, MS = Medio silvestre, TC = Terreno de cultivo, Vi = Vivienda. Datos registrados en el periodo septiembre – noviembre de 2023.

Largo y ancho de fruto

Los valores promedio para largo y ancho de fruto fueron 1.31 y 1.27 cm, respectivamente. Los frutos que presentaron el mayor tamaño fueron de origen T-Jp1-Vi en Tlaxcala, con 1.50 cm de largo y 1.47 cm de ancho, y los de H-Jp-Vi de Hidalgo, registraron los menores valores (largo = 1.05 cm, ancho = 1.03 cm) (Figura 11).

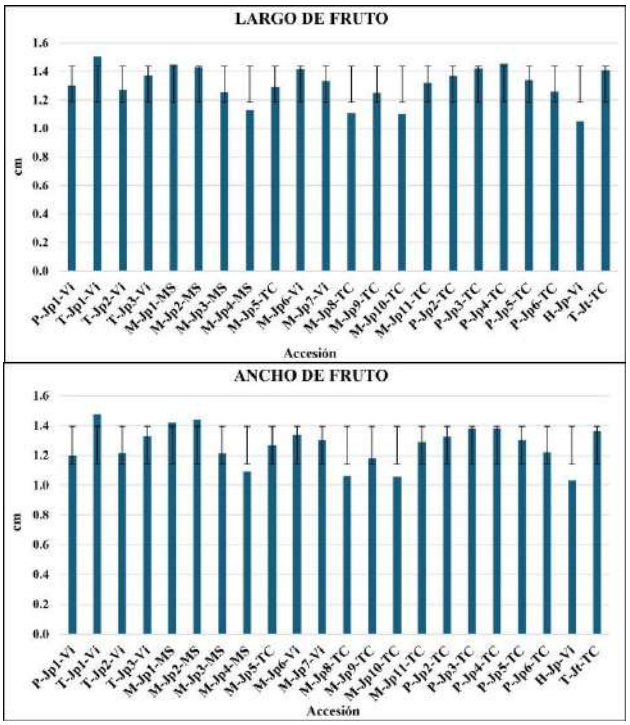


Figura 11. Largo y ancho de fruto de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala*, de los estados de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala. Abreviaturas: H = Hidalgo, M = México, P = Puebla y T = Tlaxcala, Jp = *Jaltomata procumbens*, Jt = *Jaltomata tlaxcala*, MS = Medio silvestre, TC = Terreno de cultivo, Vi = Vivienda. Datos registrados en el período septiembre – noviembre de 2023.

Número de semilla por fruto

En cuanto al número de semilla por fruto, el valor promedio fue de 111.04 semillas. Los ejemplares T-Jp1-Vi (145 semillas) y T-Jp3-Vi (144 semillas), ambos de Tlaxcala ubicados

en vivienda, presentaron el mayor número de semilla, mientras que, M-Jp4-MS de México, ubicado en medio silvestre, registró el valor más bajo con 42.7 semillas por fruto (Figura 12).

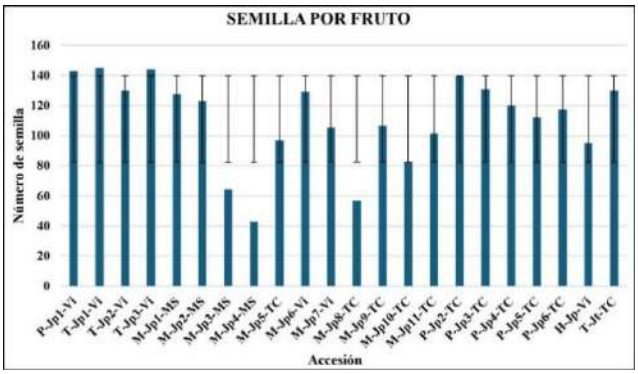


Figura 12. Número de semilla por fruto de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala*, de los estados de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala. Abreviaturas: H = Hidalgo, M = México, P = Puebla y T = Tlaxcala, Jp = *Jaltomata procumbens*, Jt = *Jaltomata tlaxcala*, MS = Medio silvestre, TC = Terreno de cultivo, Vi = Vivienda. Datos registrados en el periodo septiembre – noviembre de 2023.

Largo y ancho de semilla

Se registró un valor promedio de largo de semilla de 1.91 mm y ancho de semilla de 1.69 mm (Figura 13). El material M-Jp4-MS, registró los mayores valores de largo (2.07 mm) y ancho (2.08 mm), por el contrario, P-Jp1-Vi, presentó el menor largo y ancho con 1.63 y 1.52 mm, respectivamente (Figura 1).

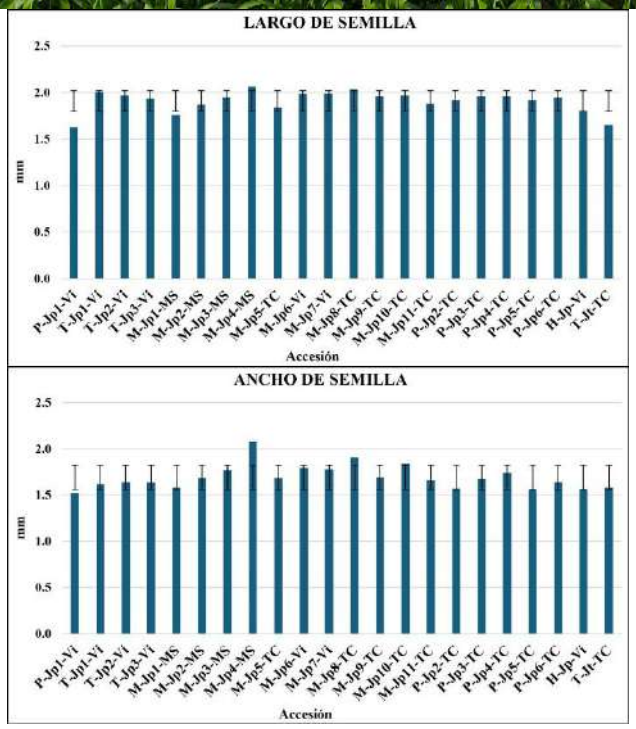


Figura 13. Largo y ancho de semilla de frutos de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala*, de los estados de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala. Abreviaturas: H = Hidalgo, M = México, P = Puebla y T = Tlaxcala, Jp = *Jaltomata procumbens*, Jt = *Jaltomata tlaxcala*, MS = Medio silvestre, TC = Terreno de cultivo, Vi = Vivienda. Datos registrados en el período septiembre – noviembre de 2023.

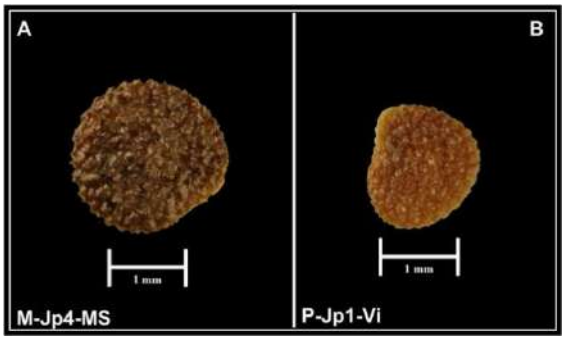


Figura 14. Ejemplares con los mayores y menores valores en largo y ancho de semilla, de las recolectas realizadas de *Jaltomata procumbens* y *Jaltomata tlaxcala*, en los estados de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala. Abreviaturas: M = México, P = Puebla Jp = *Jaltomata procumbens*, MS = Medio silvestre, Vi = Vivienda.

De las especies que conforman al género *Jaltomata* reportadas para México, *Jaltomata procumbens* es la de mayor distribución, mientras que, *Jaltomata tlaxcala*, se encuentra restringida a áreas específicas del país. Ambas especies, desde la década de los 80´s del siglo pasado, se reportaron vinculadas a la milpa, sistema tradicional de producción agrícola donde el cultivo del maíz es el elemento central, además, se documentaron prácticas de auspicio en ambas especies para su aprovechamiento a través de la recolecta con fines de autoconsumo y venta (Williams, 1985).

En este trabajo, se recolectaron 11 materiales dentro y en las orillas de terrenos de cultivo de maíz y en terrenos que se destinaban al cultivo de maíz, pero, ahora se dedican a la producción de árboles frutales, lo que representa el 50 % del germoplasma ubicado en sitios de cultivo (Figura 15 y Figura 18); también, se localizaron 7 ejemplares en jardineras de viviendas lo que representó el 31.82 % (Figura 16) y, finalmente, 4 ejemplares en medio silvestre correspondiendo al 18.18 % (Figura 17).



Figura 15. Plantas de *Jaltomata procumbens* en bordos o dentro de terreno de cultivo, Tlahuapan, Puebla (Figura 15-A) y San Felipe del Progreso, México (Figura 15-B). Fotos tomadas por I. Darío Flores-Sánchez.



Figura 16. Planta de *Jaltomata procumbens* en jardineras dentro de viviendas, Nanacamilpa, Tlaxcala (Figura 16-A) y San Felipe del Progreso, México (Figura 16-B). Fotos tomadas por I. Darío Flores-Sánchez.



Figura 17. Plantas de *Jaltomata procumbens* en medio silvestre (cerro), San José del Tunal, Atlacomulco, México. Fotos tomadas por I. Darío Flores-Sánchez.



Figura 18. plantas de *Jaltomata tlaxcala* dentro de terreno de cultivo de maíz, El Carmen Tequexquitla, Tlaxcala. Fotos tomadas por I. Darío Flores-Sánchez.

El mayor porcentaje de material vegetal encontrado en sitios de cultivo o en jardineras dentro de viviendas, permite corroborar el vínculo planta-ser humano, principalmente, a través del sistema tradicional de producción agrícola. Sin embargo, en las zonas visitadas no se evidenciaron prácticas de auspicio, y su aprovechamiento sólo se lleva a cabo a través de la recolecta de los frutos maduros pero, actualmente, su consumo es poco frecuente. Además, de acuerdo con las personas consultadas, la presencia de las especies es escaza para *J. procumbens* y rara para *J. tlaxcala*. La baja frecuencia de ambas especies está determinada, entre otros factores, por el uso de herbicidas y por el bajo interés para su conservación y

aprovechamiento, debido principalmente a que se desconocen los beneficios que tienen en la alimentación. Para el caso de *J. tlaxcala*, también influye en que su presencia sólo se da dentro de sitios de cultivo, como lo reportado por Williams (1985), Coe (1997) y Flores-Sánchez *et al*. (2021), quienes en su momento la reconocieron como una variante de *J. procumbens*, y que recientemente ha sido reconocida como una especie distinta (Flores-Sánchez *et al*., 2024).

No obstante, aún fue posible encontrar germoplasma para su estudio y evaluación con fines agrícolas y alimenticios. Del material recolectado, se pudo documentar variabilidad en las características evaluadas de altura de planta, importante porque se relaciona con arquitectura, resistencia al acame y rendimiento (Gao *et al*., 2020), diámetro de tallo, indicador del vigor de la planta (Antúnez-Ocampo *et al*., 2014), que expresa la acumulación de reservas que podrán ser traslocadas a sitios de demanda (Preciado *et al*., 2002), frutos por racimo, largo y ancho de fruto, características que están relacionadas con el rendimiento de la planta, importante en la producción de cultivos, y semilla por fruto, medio principal para dar inicio a un nuevo ciclo productivo (Finch-Savage y Bassel, 2015). Todos estos aspectos son importantes para dirigir la selección de germoplasma sobresaliente, para su aprovechamiento directo o para dar inicio con el mejoramiento de las especies, para su producción bajo condiciones de cultivo.

Conclusiones

Se obtuvieron 21 recolectas de germoplasma de *Jaltomata procumbens* y una de *Jaltomata tlaxcala*, de los estados de Hidalgo, México, Puebla y Tlaxcala.

Se observó variabilidad en características de interés agronómico de altura de planta, diámetro de tallo, frutos por racimo, largo y ancho de fruto.

Se registró escaza presencia de *Jaltomata procumbens* y rara para *Jaltomata tlaxcala*.

Los factores que principalmente influyen en la presencia de las especies son el uso de herbicidas y el bajo interés para su conservación y aprovechamiento, debido al desconocimiento de los beneficios que tienen en la alimentación.

Literatura citada

Antúnez-Ocampo O. M., Sandoval-Villa M., Alcántar-González G. y Solís-Martínez M. (2014). Aplicación de amonio y nitrato en plantas de *Physalis peruviana* L. *Agrociencia*, *48*:805817. http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v48n8/v48n8a4.pdf

Coe, L. A. (1997). The taxonomy of *Jaltomata tlaxcala* and *Jaltomata procumbens* (Solanaceae): Morphological distinctions and infertility [Master thesis, Central Connecticut State University]. Central Connecticut State University Repository. https://cscu-ccsu-primo.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/fulldisplay?vid=CCSU_V1&search_scope=CCSU&tab=default_tab&docid=01CSCU_NETWORK_ALMA7179792680003451&lang=en_US&context=L&adaptor=Local%20Search%20Engine&query=any,contains,The%20taxonomy%20of%20Jaltomata%20tlaxcala%20and%20Jaltomata%20procumbens&offset=0

Dansi A., Vodouhe R., Azokpota P., Yedomonhan H., Assogba P., Adjatin A., Loko Y. L., Dossou-Aminon I. y K. Akpagana. (2012). Diversity of the neglected and underutilized crop species of importance in Benin. *The Scientific World Journal*, *2012*(932947): 1-19. https://doi.org/10.1100/2012/932947

Finch-Savage W. W. y Bassel G. W. (2015). Seed vigour and crop establishment: Extending performance beyond adaptation. *Journal of Experimental Botany*, *67*(3): 567-591. https://doi.org/10.1093/jxb/erv490

Flores-Sanchez, I. D. (2022). Potencial agronómico y calidad de fruto de dos formas de *Jaltomata procumbens* (Cav.) J. L. Gentry, erguida y decumbente, del estado de Tlaxcala. Postgrado de Edafología, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, México, 173. Available at: http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/5148.

Flores-Sánchez I. D., Sandoval-Villa M. y Soto-Hernández R. M. (2023). Effects of electrical conductivity and pruning on secondary metabolite contents in fruits of *Jaltomata procumbens* (Cav.) J. L. Gentry. *Natural Product Communications*, *18*(3):1-11. https://doi.org/10.1177/1934578X221150547

Flores-Sánchez I. D., Sandoval-Villa M., Alcántar-González E. G., Sánchez-García P., Soto-Hernández R. M. y Uscanga-Mortera E. (2021). Caracteres agronómicos de dos poblaciones de *Jaltomata procumbens* (Cav.) J. L. Gentry. *Agronomía Mesoamericana*, *32*(3), 733 – 749. https://doi.org/10.15517/am.v32i3.43738

Flores-Sanchez, I. D., Sandoval-Villa, M., y Uscanga-Mortera, E. (2022). Breaking seed dormancy of *Jaltomata procumbens* (Cav.) J. L. Gentry seeds with the use of KNO_3. *Crops*, 2, 99–110. https://doi.org/10.3390/crops2020008

Flores-Sánchez, I.D., Sandoval-Villa, M., Uscanga-Mortera, E. y Silva-Rojas, H.V. (2024). *Jaltomata tlaxcala*, a new species of the genus *Jaltomata* (Solanaceae, Solanoideae, Solaneae). Phytotaxa, 641, 85–98. https://doi.org/10.11646/phytotaxa.641.2.1

Flores-Sánchez, I.D., Sandoval-Villa, M. y Uscanga-Mortera E. (2025). Nutrient uptake of two semidomesticated *Jaltomata* Schltdl. species for their cultivation. *Plants*, 14, 1124. https://doi.org/10.3390/plants14071124

Gao Z., Wang Y., Tian G., Zhao Y., Li C., Cao Q., Han R., Shi Z. y He M. (2020). Plant height and its relationship with yield in wheat under different irrigation regime. *Irrigation Science*, *38*: 365–371. https://doi.org/10.1007/s00271-020-00678-z

INEGI. (2018). Marco geoestadístico. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Consultado el 19 de septiembre de 2023. https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463674658

Mera-Ovando LM, Alvarado-Flores R, Basurto-peña F, Bye-Bottler R., Castro-Lara D., Evangelista V., Mapes-Sánchez C., Martínez-Alfaro M. Ä., Molina N., y Saldívar J. (2003). De quelites me como un taco. Experiencia en educación nutricional. Revista del Jardín Botánico Nacional, *24*(1-2):45-49. https://www.jstor.org/stable/42597191.

Mione, T. (Universidad Estatal Central de Connecticut, Nueva Bretaña, CT, USA). Personal Communication, 2024. https://sites.ccsu.edu/faculty/mione/jaltomat.htm

Mione, T., Leiva, G.S. y Yacher, L. (2015). *Jaltomata sanmiguelina* (Solanaceae), a new species from northern Peru. University Proceedings, Volga region. *Natural Sciences* 3 (11): 3–13

Nixwell M.F., Petrova C.V.G., Thembinkosi M.A. y Mabhaudhi T. (2022). Neglected and underutilised crops: A systematic review of their potential as food and herbal medicinal crops in South Africa. *Frontiers in Pharmacology*, *12*(809066):1-31. https://doi.org/10.3389/fphar.2021.809866

Padulosi S., Thompson J. y Rudebjer P. (2013). Fighting poverty, hunger and malnutrition with neglected and underutilized species (NUS): needs, challenges and the way forward. Biodiversity International, Rome.

Preciado R. P., Baca C. G. A., Tirado T. J. L., Kohashi-Shibata J., Tijerina C. L. y Martínez G. A. (2002). Nitrógeno y potasio en la producción de plántulas de melón. *Terra Latinoamericana*, *20*(3): 267–276. https://www.researchgate.net/publication/237036648

WHO (2020). Guidance on mainstreaming biodiversity for nutrition and health (Geneva: World Health Organization), 1–100. Disponible en: https://www.who.int/publications/i/item/9789240006690.

Williams D. E. (1985). Tres arvenses solanáceas comestibles y su proceso de domesticación en el estado de Tlaxcala, México (Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados).

Repositorio del Colegio de Postgraduados. http://catalogo.colpos.mx:81/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=16343

Morfología de plántulas de *Capsicum pubescens* procedentes del estado de Michoacán, México

Carlos Cisneros-Ponce[61], Ana Karen Escalera-Ordaz*, Héctor Guillén-Andrade

Resumen

Capsicum pubescens (chile perón) es una especie de gran importancia económica y cultural en el estado de Michoacán, México; sin embargo, la información disponible sobre su variabilidad morfológica en plántula es limitada. El presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar y evaluar la variabilidad morfológica de plántula de 25 variedades cultivadas de *C. pubescens* procedentes de diferentes municipios del estado de Michoacán. La caracterización fue hecha *ex situ* con base en el descriptor morfológico propuesto por el IPGRI (1995), en total, fueron evaluadas diez variables cualitativas y dos cuantitativas. Los datos obtenidos fueron analizados mediante análisis de varianza en una vía en la plataforma SAS® on Demand (2025). Los resultados obtenidos mostraron diferencias altamente significativas ($\alpha \leq 0.05$) para nueve de diez variables cualitativas, con coeficientes de determinación (R^2) que oscilaron entre 0.15 y 0.68. Los caracteres pertenecientes al tallo presentaron un mejor ajuste lineal al modelo utilizado. Las plántulas avaluadas presentaron predominancia de hipocótilos morados (56 %), pubescencia densa del hipocótilo (51 %) y hojas cotiledóneas lanceoladas (49 %), en contraste con una notable uniformidad en el color del tallo (98 % verde). Estos resultados evidencian variabilidad morfológica de plántulas, útil para la identificación y conservación en futuros programas de mejoramiento genético de C. *pubescens*.

Palabras Clave: chile perón, plántula, variedades cultivadas, y variabilidad morfológica.

Abstract

Capsicum pubescens (chili perón) is a species of great economic and cultural importance in the state of Michoacán, Mexico; however, available information on its morphological variability at the seedling stage is limited. The present study aimed to characterize and evaluate the seedling morphological variability of 25 cultivated varieties of *C. pubescens* from different municipalities in the state of Michoacán. Characterization was carried out *ex situ* based on the morphological descriptor proposed by IPGRI (1995); in total, ten qualitative

[61] Laboratorio de Recursos Fitogenéticos de la Unidad de Investigaciones Avanzadas en Agrobiotecnología de la Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Paseo Lázaro Cárdenas esquina con Berlín 2290, colonia Emiliano Zapata, Uruapan, Michoacán, México. CP. 60170. Tel. 452 5236474. 2128244a@umich.mx, *ana.escalera@umich.mx, hector.guillen@umich.mx

variables and two quantitative variables were evaluated. The data obtained were analyzed using one-way analysis of variance on the SAS® on Demand (2025) platform. The results showed highly significant differences ($\alpha \leq 0.05$) for nine of the ten qualitative variables, with coefficients of determination (R^2) ranging from 0.15 to 0.68. Stem characters showed a better linear fit to the model used. The seedlings evaluated showed a predominance of purple hypocotyls (56 %), dense hypocotyl pubescence (51 %), and lanceolate cotyledon leaves (49 %), in contrast to notable uniformity in stem color (98 % green). These results demonstrate morphological variability among seedlings, useful for identification and conservation in future breeding programs for *C. pubescens*.

Keywords: perón chili, seedling, cultivated varieties and morphological variability.

Introducción

El género Capsicum es representado como una de las hortalizas más importantes en la producción mundial (Latournerie-Moreno *et al.,* 2017), con un estimado de 44 millones de toneladas. China se ha posicionado como el principal productor de chile con una producción de 17 millones de toneladas, seguido de México, Turquía e India, entre otros (FAOSTAT, 2025). En México, la producción de chile en 2024, fue de 3,220,428 $t\ ha^{-1}$, en donde los principales estados productores son: Chihuahua, Guanajuato, Jalisco, San Luis Potosí, Sinaloa, Sonora, Zacatecas y Michoacán; este último cuenta con una superficie sembrada de 4,323 ha y con una producción de 127,744 $t\ ha^{-1}$ (DGSIAP, 2024). En esta región, *C. pubescens* es una de las principales especies cultivadas (Barrios-Puente *et al.,* 2014), con una producción de 1900 t. (DGSIAP, 2024). Lo que puede constituirse como una alternativa económica viable para el desarrollo (Ayala *et al*., 2017), especialmente para las regiones montañosas, lo cual genera rentabilidad y productividad a mediano y largo plazo (Xingú-López *et al.,* 2025), haciéndolo un producto con alto nivel de comercialización (Almaraz-Sánchez *et al.,* 2019).

C. pubescens es una planta perteneciente a la familia *Solanaceae*, la cual presenta características morfológicas distintivas que la diferencian de otras especies del género. Aunque su origen es incierto, por sus características morfológicas y moleculares se espeque puede ser su propio progenitor (Casas *et al.,* 2017) o derivar de los ancestros de *Capsicum chacoense* de flor morada (Zou y Zhu, 2022). La planta produce frutos ricos en metabolitos secundarios de alto valor biológico, que incluyen los capsaicinoides, carotenoides, carotenos, tocoferoles y vitaminas A y C, los cuales se asocian con propiedades antioxidantes, analgésicas, antiinflamatorias y antibacterianas (Martínez, 2019; Osorio-Barraza *et al.,* 2021).

La diversidad fitogenética constituye un pilar fundamental para la adaptación ante desafíos ambientales (SADER, 2020), pero enfrenta una amenaza crítica debido a la erosión genética. Este proceso, intensificado por factores como el crecimiento urbano acelerado, la degradación ambiental y la sustitución de las variedades nativas o locales por cultivos comerciales en los sistemas de producción, ocasiona una pérdida progresiva de genes (FAO, 2023). Por ello, la conservación *ex situ* surge como una estrategia fundamental para salvaguardar el material vegetal fuera de su entorno original (Martín, 2001). El ingreso y resguardo de las colectas, facilita el desarrollo de investigaciones especializadas destinadas a evaluar y caracterizar la morfología de las plantas, al identificar genotipos sobresalientes o con características óptimas para el consumo (Clausten *et al.,* 2017). La actividad de documentar la variabilidad morfológica resulta crucial, ya que provee un conocimiento profundo sobre la variabilidad genética de una población y sus caracteres de alta heredabilidad, esta actividad representa la herramienta inicial más efectiva para diferenciar taxonómicamente a las plantas y establecer programas de fitomejoramiento (Hernández-Villarreal, 2013). Para cumplir este propósito de forma estandarizada, se recurre a descriptores oficiales de caracterización, los cuales registran caracteres de alta heredabilidad que se expresan en todos los ambientes (IPGRI, 1995). El interés de México por aprovechar este material nativo se refleja en el desarrollo de nuevas variedades tales como Dali, Maruca, Reynolito y Mayito (Hernández-Hernández *et al.,* 2024; Hernández-Hernández *et al.,* 2025), que buscan cubrir necesidades de interés agronómico (Tripodi y Kumar, 2019).

C. pubescens en Centroamérica y México cuenta con una diversidad y mezcla genética menor a la de otras zonas del continente americano (Palombo y Carrizo, 2022); sin embargo, su variabilidad morfológica en frutos es amplia (Escalera-Ordaz y Guillén-Andrade, 2019), incluso con una alta variabilidad dentro de las poblaciones (Leyva-Ovalle *et al.,* 2018), debido a su enfoque en el aumento de producción y mejora en la resistencia, lo que genera esta variabilidad (Xingú-López *et al.,* 2025). La mayoría de los trabajos de investigación se enfocan en órganos maduros o estructuras comerciales, por lo que se desconoce el comportamiento y la variabilidad presente en las etapas de plántula. Por ello, la caracterización morfológica de *C. pubescens* en etapa temprana resulta fundamental para el conocimiento, conservación y mejoramiento genético de esta especie. En la presente investigación se planteó caracterizar y evaluar la variabilidad morfológica de plántula de *C. pubescens* procedentes de diferentes municipios de Michoacán, entre los que se encuentran Paracho, Tacámbaro, Tancítaro, Tingambato y Uruapan, para futuros trabajos de investigación.

Materiales y métodos

El presente trabajo de investigación fue desarrollado en las instalaciones del Laboratorio de Recursos Fitogenéticos (LAREFI) de la Unidad de Investigaciones Avanzadas de Agrobiotecnología (UIAA) de la Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez", dependiente de la Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, con ubicación en la ciudad de Uruapan Michoacán, México.

El material genético evaluado consistió de 25 variedades cultivadas de *C. pubescens* provenientes de diferentes municipios de Michoacán, México. En el Cuadro 1, se muestra la ubicación geográfica del sitio de origen del material en estudio. La semilla fue proporcionada por el LAREFI de la UIAA situado en la Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez". Posteriormente, se hizo la selección de 20 semillas de cada colecta, las cuales se eligieron con base a su apariencia, dichas semillas fueron puestas bajo el proceso de imbibición a base de algas marinas (1.5 g L^{-1}) durante 24 horas, posteriormente, fueron colocadas en semilleros de plástico de 72 cavidades, preparados con sustrato (perlita, peat moss y tierra de encino). En cada cavidad fueron colocadas de tres semillas y se colocó una etiqueta con la clave para su identificación. Dichas charolas se ubicaron: bajo condiciones de invernadero, con riego y monitoreo constante, una vez que desarrollaron entre cinco y siete hojas verdaderas fueron separadas y colocadas en bolsas de vivero de 10 x 15 cm hasta desarrollar diez hojas verdaderas para así establecerlas en el invernadero de la UIAA.

Cuadro 1. Ubicación geográfica del sitio de origen de 25 variedades cultivadas de *C. pubescens* procedentes del estado de Michoacán, México.

Variedades cultivadas	Municipio	L.N.	L.O.
LAREFI 1	Tancítaro	19° 15' 33"	102° 16' 15"
LAREFI 2	Uruapan	19°24'25.92"	102°03'06.64"
LAREFI 3	Tancítaro	19° 20′ 15″	102° 21′ 47″
LAREFI 4	Tancítaro	19° 20′ 15″	102° 21′ 47″
LAREFI 5	Uruapan	19° 24′ 44″	102°03′06.64"
LAREFI 6	Tancítaro	19° 15' 50"	102° 21' 44"
LAREFI 7	Tancítaro	19° 20' 22"	102° 19' 56"
LAREFI 8	Uruapan	19°26'29.23"	101°59'52.90"
LAREFI 9	Tancítaro	19° 20′ 15″	102° 21′ 47″
LAREFI 10	Tancítaro	19° 20′ 15″	102° 21′ 47″
LAREFI 11	Uruapan	19°24'25.92"	102°03'06.64"
LAREFI 12	Tancítaro	19° 15' 33"	102° 16' 15"
LAREFI 13	Paracho	19° 39′ 47″	102° 01′ 21″
LAREFI 14	Uruapan	19°30'23.13"	102°03'19.27"

LAREFI 15	Uruapan	19°26'23.82"	101°59'53.50"
LAREFI 16	Tancítaro	19°15′58”	102°19′02″
LAREFI 17	Tancítaro	19°15′58”	102°19′02″
LAREFI 18	Tacámbaro	19°20'31.1"	101°24'12.0"
LAREFI 19	Tancítaro	19°19′34″	102°16′57″
LAREFI 20	Tingambato	19°31'07.32"	101°50'48.54"
LAREFI 21	Tingambato	19°30'05.75"	101°51'09.51"
LAREFI 22	Tancítaro	19°15′58”	102°19′02″
LAREFI 23	Tancítaro	19°15′58”	102°19′02″
LAREFI 24	Tingambato	19°31'08.83"	101°50'36.16"
LAREFI 25	Uruapan	19°26'28.27'	101°52'52.87"

Las plántulas se fertilizaron al momento de ser trasplantadas, además, recibieron riego y labores culturales de manera uniforme, posterior a que las plántulas desarrollaron diez hojas verdaderas se inició con la caracterización morfológica, se usó como guía el descriptor para Capsicum propuesto por el Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos (IPGRI,1995). Para el cual se fueron consideradas las siguientes variables cualitativas: color del hipocótilo, pubescencia del hipocótilo, color y forma del cotiledón; estas características se evaluaron con base en la guía del descriptor morfológico. Las características cuantitativas medidas fueron: la longitud y ancho del cotiledón, estas variables se rigieron bajo la condición del desarrollo completo del cotiledón, presentes en cada plántula.

La toma de datos para las variables cualitativas se hizo con base en los parámetros del descriptor propuesto por el IPGRI (1995), en donde fue considerado la percepción visual. Posteriormente se hizo una matriz de datos en formato Excel en donde capturó la información de los resultados de las características evaluadas. La matriz de datos fue sometida a un análisis de varianza PROC ANOVA para determinar diferencias estadísticas significativas.

Resultados y discusión

Las variedades cultivadas de chile perón, presentaron un comportamiento muy similar en la mayoría de las características analizadas. En el Cuadro 2, se representan los estadísticos simples para cada una de las variables analizadas. Los coeficientes de determinación (R^2) generados oscilaron desde un valor mínimo de R^2= 0.15 (ancho del cotiledón) hasta un máximo de R^2= 0.68 (color, forma y pubescencia del tallo). Con respecto al coeficiente de variación (C.V.), los valores fluctuaron entre 8.57 (color, forma y pubescencia del tallo) a 42.74 (ancho de forma del cotiledón). Por su parte, la raíz cuadrada media del error (RME) registró su nivel más bajo en el color y forma del tallo con 0.08, mientras que el valor más

alto se observó en la longitud del cotiledón con 14.89. En cuanto a los valores de la media para las variables cuantitativas fueron de 25.33 para ancho del cotiledón y 37 para la longitud del cotiledón.

Cuadro 2. Estadísticos simples, obtenidos del análisis de varianza aplicado para doce variables evaluadas en 25 plántulas de C. *pubescens* procedentes de Michoacán, México.

Variable	R^2	C.V.	RME	Media	Pr>F
Color de Hipocótilo	0.28	21.38	0.53	2.51	0.0029
Pubescencia del hipocótilo	0.42	28.05	0.64	2.31	<.0001
Color de cotiledón	0.40	41.82	0.68	1.63	<.0001
Forma del cotiledón	0.19	31.23	0.92	2.97	0.1726
Longitud del cotiledón	0.18	40.25	14.89	37.00	0.2346
Ancho del cotiledón	0.15	42. 74	10.82	25.33	0.465
Color de tallo	0.68	8.57	0.08	0.98	<.0001
Forma de tallo	0.68	8.57	0.08	0.98	<.0001
Pubescencia de tallo	0.68	8.57	0.42	4.90	<.0001
Densidad de ramificación	0.29	28.69	1.28	4.47	0.0013
Macollamiento	0.28	23.15	0.73	3.15	0.0029
Densidad de hojas	0.33	27.50	1.31	4.77	<.0001

Coeficiente de determinación (R^2), Coeficiente de variación (C.V.), Raíz cuadrada media del error (RME)

Los análisis estadísticos revelaron una sólida consistencia en la mayoría de las relaciones evaluadas. Lo que demuestra un efecto altamente significativo ($\alpha \leq 0.0001$) en las variables como la pubescencia del hipocótilo, el color del cotiledón; color, forma y pubescencia del tallo y la densidad de hojas. Los parámetros de densidad de ramificación (Pr>F = 0.0013) y macollamiento (Pr>F = 0.0029), también exhibieron diferencias estadísticas significativas. En contraste, las variables asociadas a la forma, longitud y ancho del cotiledón (Pr>F =0.1726, 0.2346 y 0.465, respectivamente) no mostraron efectos significativos dentro del modelo evaluado. Ayala *et al.,* (2017) caracterizó híbridos de chile manzano y reporta que las plantas presentaron valores aproximados a los 13 cm en el largo de la hoja, mientras que en el ancho oscilaron entre los 6.52 a 7.15 cm; no obstante, la planta que fue evaluada estaba en madurez fisiológica. En cambio, en el estudio presentado por Castañeda (2023), en donde se caracterizaron accesiones de Capsicum, fueron obtenidos datos de media de 1.48 cm y 0.43 cm para longitud y ancho del cotiledón, respectivamente.

En la Figura 1, se presentan los resultados porcentuales obtenidos de las variables cualitativas evaluadas en las colectas de *C. pubescens*. Donde: el color de hipocótilo (Figura 1A), predominó con una coloración morada (56 %), seguida de la verde (42 %) y en menor proporción, la blanca (2 %). Asimismo, la pubescencia del hipocótilo (Figura 2B) mostró una predominancia de la categoría densa (51 %), seguida de la intermedia (31 %) y escasa (18 %). La presencia de los tricomas se ve influenciada por los alelos dominantes, dicha característica permite a las plantas protegerse de la depredación, sequía y radiación (Kim *et al.,* 2010). En relación al color del cotiledón (Figura 1C) las categorías; verde (47 %) y verde claro (45 %) se llegaron a presentar en proporciones similares, mientras que el verde oscuro fue el que se notó en menor medida (8 %). De la misma manera, la forma del cotiledón (Figura 1D) su característica con mayor registro fue la forma lanceolada (49 %), seguida de la elongada deltoide (31 %), oval (14 %) y deltoide (6 %). En contraste con las características anteriores, el color de tallo (Figura 1E) mostro un 98 % en tallos verdes lo que representa una uniformidad en las colectas estudiadas.

En un trabajo similar, hecho en Perú (Espinoza, 2017) sobre caracterización morfológica en ajíes del Perú, se determinó una gran variabilidad para la mayor parte de los descriptores; sin embargo, en esta investigación no se reporta variabilidad en la forma del cotiledón. Debido a que la forma de la hoja se ve influenciada por el clima, así como por la disponibilidad de agua. En ambientes cálidos y húmedos, las hojas necesitan ser lo más planas y redondas posibles para permitir un intercambio entre agua y aire con el exterior; mientras que en ambientes cálidos y secos las hojas tienen una estructura más gruesa, lo que permite resistir el marchitamiento (Li y Wang, 2021). Ayala *et al.,* (2017), indican que cuatro de seis caracteres cualitativos fueron contrastantes, entre estos la variable color de tallo (Figura 1E), en la cual se observó la presencia únicamente de la coloración verde. Los resultados obtenidos pueden deberse a que la generación de pigmentos en las plantas, está regida por factores genéticos y ambientales, en el cual genéticos son aquellos que limitan los tipos y cantidades de pigmentos producidos, mientras que los ambientales se originan de manera protectora (Singh *et al.,* 2026). En el caso de Capsicum la pigmentación se debe a la presencia de antocianinas, el purpura el más común (Aza-Gonzáles *et al.,* 2012). En un estudio similar, Escalera-Ordaz (2020), caracterizó morfológicamente chiles manzano del estado de Michoacán, los cuales, por su amplia variabilidad en el tejido foliar, fruto y semilla se determinaría que son aptos para reservar sus genes, pero a pesar de eso, se determinó que la recolecta fue influenciada por las características agroecológicas de las zonas.

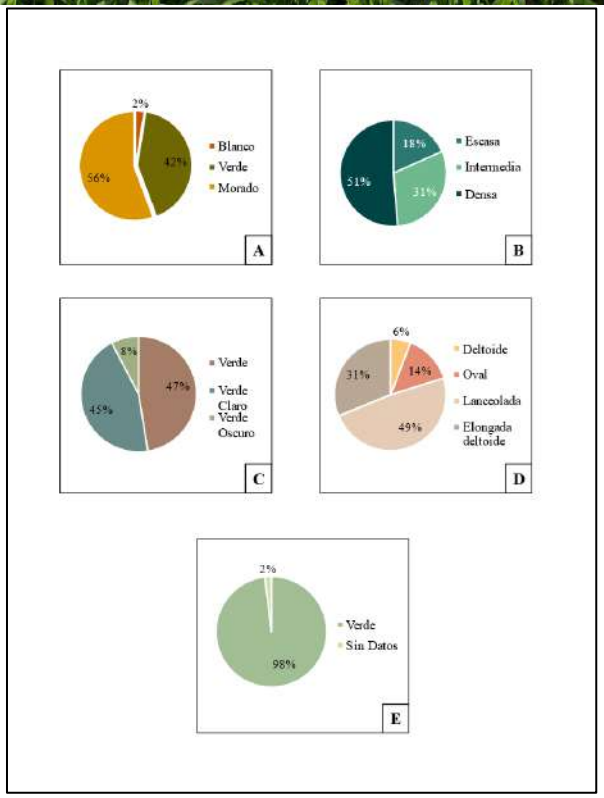


Figura 1. Características cualitativas: color de hipocótilo **(A),** pubescencia del hipocótilo **(B),** color del cotiledón **(C)** forma del cotiledón **(D),** color del tallo **(E)**, evaluados en 25 variedades cultivadas de *C. pubescens,* procedentes del estado de Michoacán, México.

En la Figura 2, se observan los datos obtenidos de forma porcentual en las variables: forma y pubescencia del tallo, densidad de ramificación, macollamiento y densidad de hoja. Las características predominantes (98 %) en el material analizado fueron la forma y pubescencia del tallo; mientras que las demás características representaron el 2% (Figura 2).

En relación con la densidad de ramificación (Figura 2C) destacó la densidad intermedia (54 %), seguido por la densidad escasa y densa (33 %, respectivamente). Asimismo, en el macollamiento (Figura 2D); el macollamiento escaso fue el que predominó (88 %), seguido de uno intermedio (9 %) y el macollamiento denso representó solamente el 1 % de los materiales. En cuanto a la densidad de hojas (Figura 2E), la intermedia predominó (54 %), seguida de la escasa (25 %) y, en menor medida la densa (19 %). Resultados similares (Castañeada, 2023) a los obtenidos en nuestro trabajo en algunas características como la forma del tallo, densidad de ramificación y densidad de hojas; en contraste con la pubescencia

del tallo y el macollamiento. En otro estudio Correa-Álvarez *et al.,* (2019), nueve descriptores fueron descartados por no presentar variación, entre ellos; la forma y el color de tallo. La coloración verde es debido a la clorofila, la cual ayuda a evitar daños al absorber el exceso de energía, liberándola en forma de calor; asimismo, cumple funciones en la regulación del crecimiento y desarrollo en las plantas, protegiéndolas de factores de estrés ambiental (Andrew, 2023).

La distribución de frecuencias para la longitud del cotiledón en las variedades cultivadas de *C. pubescens*, evidenció una fuerte tendencia central y una distribución concentrada en las zonas intermedias (Figura 3). En el rango mínimo para el largo del cotiledón, se presentaron nueve plántulas con longitudes menores a 10 mm, mientras que la mayor parte de las plántulas presentaron longitudes entre 20 a 60 mm, mientras que solo dos se observaron con la mayor longitud entre 88 a 98 mm. Lo que muestra que, existe variabilidad morfológica de esta característica.

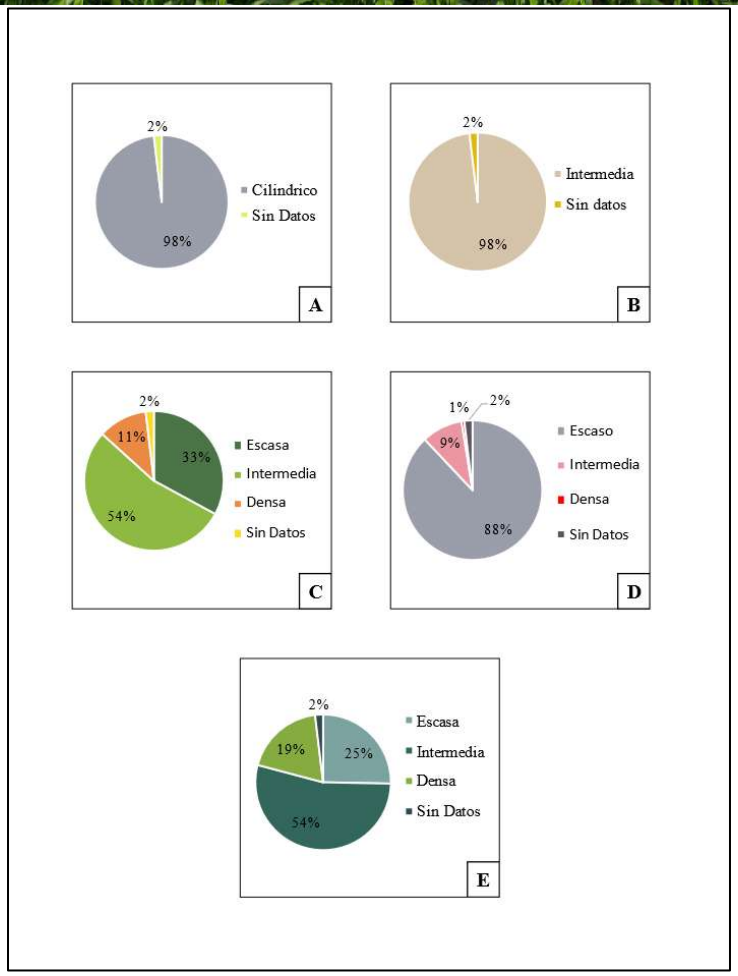


Figura 2. Características cualitativas: forma del tallo **(A),** pubescencia del tallo **(B),** densidad de ramificación **(C),** macollamiento **(D),** densidad de hojas **(E),** evaluados en 25 variedades cultivadas de *C. pubescens,* procedentes del estado de Michoacán, México.

Por su parte, Espinoza (2017), indica longitudes de cotiledones que van desde 21.6 a 26.2 mm, los cuales son similares a los determinados en este trabajo. Asimismo, Valdez (2017), presento datos obtenidos en la zona de Arequipa, Perú, en donde las plántulas evaluadas presentaron una longitud que fluctuó entre 17.3 a 19.6 mm. Estos valores de longitud promedio son menores a los determinados en nuestro trabajo (29 a 39 mm).

Esta diferencia en longitudes de cotiledón, se relaciona a la variación de las condiciones ambientales de los sitios de estudio. En este sentido, Wright *et al.,* 2017 señala que

en regiones de desiertos cálidos como en regiones frías, predomina la presencia de hojas pequeñas debido a las drásticas limitaciones térmicas diurnas y nocturnas del entorno; en contraste, ambientes con mayor humedad relativa propicia el desarrollo de hojas grandes. Por lo tanto, plantas que desarrollan un menor de número de hojas, pero de gran tamaño poseen una ventaja adaptativa en las mañanas frescas, ya que logran calentarse de forma más eficiente, hasta alcanzar temperaturas óptimas para la fotosíntesis, lo que mantiene su rendimiento fisiológico, incluso bajo un ambiente frio, siempre que exista la disponibilidad de agua para transpirar. Además, que las hojas pequeñas reducen el riesgo de depredación, las de mayor superficie se ven favorecidas en condiciones de sombra profunda, lo que explica la diferencia de las variedades cultivadas.

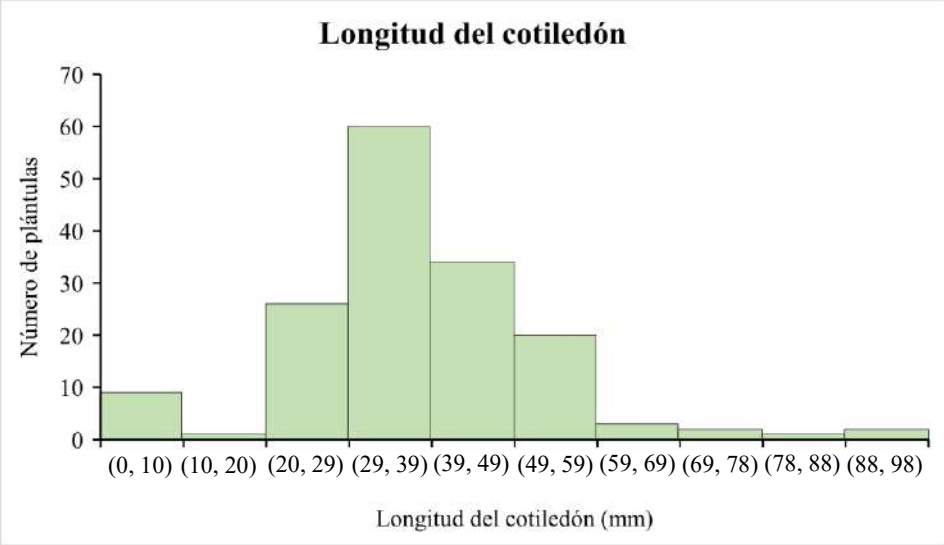


Figura 3. Histograma de frecuencias para longitud del cotiledón evaluados en 25 variedades cultivadas de *C. pubescens*, procedentes del estado de Michoacán, México.

En la Figura 4, se refleja la distribución de frecuencias para el ancho del cotiledón de las variedades cultivadas de *C. pubescens* en donde se observó con una fuerte tendencia central concentrada en los rangos intermedios. El rango mínimo fue menor a 7 mm en la cual, se presentaron solo nueve observaciones, mientras que, la mayor parte de la población se concentró entre 14 a 35 mm; en contraste, solo tres plántulas presentaron anchos de cotiledón que oscilaron entre los 56 y 63 mm. Lo que sugiere que hay variabilidad morfológica en lo relacionado al ancho del cotiledón.

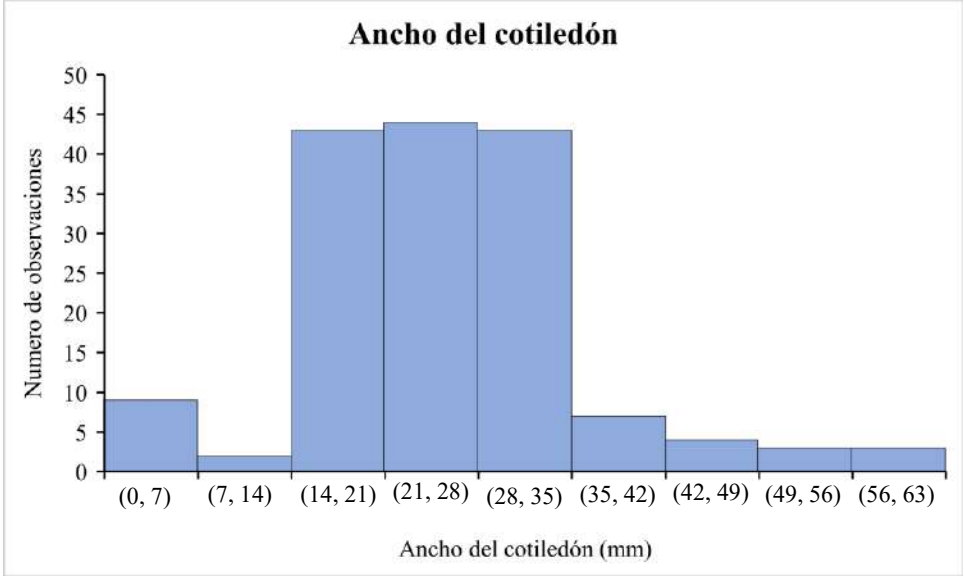


Figura 4. Histograma de ancho del cotiledón evaluados de 25 variedades cultivadas de *C. pubescens*, procedentes del estado de Michoacán, México.

Espinoza (2017) en una población de ajíes en Perú determinó, una gran variación en el ancho del cotiledón: el 53.5 % de la población estudiada se ubicó en un intervalo entre 5.0 a 5.6 mm. Por otra parte, Valdez (2017) en chiles de Arequipa determino un ancho que fluctuaron entre 7.0 a 8.0 mm. Estos resultados muestran valores promedio menores con los obtenidos en nuestro trabajo (14 a 35 mm) lo cual indica que nuestros materiales son de mayor dimensión.

Estas diferencias cobran gran relevancia biológica, ya que los rasgos morfológicos de las hojas especialmente su tamaño, se reflejan de manera directa en los ciclos del agua y de los nutrientes, puesto que una superficie foliar grande genera una mejor captación de luz, lo que aumenta la clorofila producida. Asimismo, dichas características reflejan la capacidad de respuestas de las poblaciones vegetales ante el cambio climático (Li y Wang, 2021).

Conclusión

Las variedades cultivadas de *C. pubescens,* presentaron una amplia variabilidad morfológica en estado de plántula. El ancho, color y longitud de cotiledón presentaron la mayor variación entre las variedades cultivadas de *C. pubescens*. Las características evaluadas pueden servir como criterio de selección en programas de mejoramiento genético.

Literatura citada

Almaraz-Sánchez, A., Ayala-Escobar, V., Tlatilpa-Santamaría, I. F., & Nieto-Angel, D. (2019). *Fusarium sambucinum* Fuckel causal agent of fruit rot of manzano chilli pepper (*Capsicum pubescens*) in Mexico. *Revista Mexicana de Fitopatología, 37*(1), 159-169. https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1810-2

Andrew, J. (2023). Significance of chlorophyll and its functions in plants. Journal of Plant Biochemistry & Physiology, *11*(1): 2p.

Ayala Arias, B., Mejía Carranza, J., Martínez Estrada, I., Rubí Arriaga, M., & Vázquez García, L. M. (2017). Caracterización morfológica de híbridos de chile manzano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *8*(4): 825-836.

Aza-González, C., Núñez-Palenius, H. G., y Ochoa-Alejo, N. (2012). Molecular Biology of Chili Pepper Anthocyanin Biosynthesis. Journal of the Mexican Chemical Society, *56*(1): 93-98. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-249X2012000100015

Barrios-Puente, G., Espinosa-Torres, L. E., Figueroa-Hernández, E., y Ramírez-Abarca, O. (2014). Evaluación técnica, financiera y comercial de los sistemas de producción de chile manzano (*Capsicum pubescens* R. & P.) en México. *Análisis Económico*, *29* (71): 209-219.

Casas, A., Torres-Guevara, J., & Parra, F. (2017). *Ajíes or chile peppers (*Capsicum spp.*): History and biology. Investigación para el manejo sustentable de recursos genéticos en el Nuevo Mundo*. Universidad Nacional Agraria La Molina. 177-191.

Castañeda Blas, M. F. (2023). *Caracterización morfológica de accesiones de* Capsicum spp. *del banco de germoplasma del Instituto Nacional de Innovación Agraria-INIA* (Tesis de licenciatura, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión). Repositorio Institucional UNJFSC. 55p.

Clausen, A., Ferrer, M., Atencio, H., Menéndez, S. M., Formica, B., Defacio, R., Ferreyra, M., y Rosso, B. (2017). Conservación, utilización y accesos a recursos fitogenéticos de importancia para la agricultura y la alimentación. *Nexos*, Universidad Nacional de Mar del Plata *23* (31): 5-9.

Correa-Álvarez, E. M., León-Pacheco, R. I., Lobato-Ureche, M. A., García-Dávila, M. A., Muñoz-Perea, C. G., y Aramendiz-Tatis, H. (2019). Caracterización

morfoagronómica de la colección de germoplasma de ají dulce (Capsicum spp.) del Caribe colombiano. *Temas Agrarios*, *24*(2): 81-95. https://doi.org/10.21897/rta.v24i2.1998

Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [DGSIAP]. (2024). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. agricultura.gob.mx Fecha de consulta: 21 de julio del 2026.

Escalera Ordaz, A. K. (2020). *Caracterización de chile manzano (Capsicum pubescens R. y P.) en el estado de Michoacán* (Tesis de doctorado, Universidad Autónoma de Nayarit). Repositorio Institucional UAN. 130p.

Escalera-Ordaz, A. K., y Guillén-Andrade, H. (2019). Chile Perón: Variabilidad de formas y colores. Saber Más: Revista de Divulgación, *8*(48). 41-44.

Espinoza Peralta, D. I. (2017). *Caracterización morfológica de ajíes de la costa del Perú* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio Institucional UNALM. 126 p.

Hernández-Hernández, I., Pérez-Grajales, M., Rodríguez-Pérez, J. E., y Peña-Lomelí, A. (2024). Mayito: Nueva variedad de chile manzano. *Revista Fitotecnia Mexicana, 47*(3): 321-323. https://doi.org/10.35196/rfm.2024.3.321

Hernández-Hernández, I., Pérez-Grajales, M., Rodríguez-Pérez, J. E., y Peña-Lomelí, A. (2025). Reynolito: Nueva variedad de chile manzano. *Revista Fitotecnia Mexicana, 48*(1): 1-93. https://doi.org/10.35196/rfm.2025.1.93

Hernández-Villarreal, A. E. (2013). Caracterización morfológica de recursos fitogenéticos. *Revista Bio Ciencias, 2*(3): 113-118. https://doi.org/10.15741/revbio.02.03.05

IPGRI, AVRDC, y CATIE. (1995). *Descriptores para* Capsicum (Capsicum spp.). Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos; Centro Asiático para el Desarrollo y la Investigación relativos a los Vegetales; Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 51 p. https://qrgj.org/wp-content/uploads/2020/11/Descriptors-for-capsicum-Capsicum-spp.pdf

Kim, H. J., Han, J. H., Kim, S., Lee, H. R., Shin, Y., Kim, J. H., Cho, J., Kim, B. D., y Kang, B. C. (2010). Fine mapping of pepper trichome locus 1 controlling trichome formation in *Capsicum annuum* L. CM334. Theoretical and Applied Genetics, *120*(5): 1059-1066. https://doi.org

Latournerie Moreno, L., López Vázquez, J. S., Castañón Nájera, G., Mijangos Cortés, J. O., Espadas Vergara, G., Pérez Gutiérrez, A., & Ruiz Sánchez, E. (2015). Evaluación agronómica de germoplasma de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Agroproductividad*, *8*(1): 24-29.

Leyva-Ovalle, O. R., Andres-Meza, P., Del Valle-Hernández, D., Meneses-Márquez, I., Murguía-González, J., Galindo-Tovar, M. E., López-Sánchez, H., Serna-Lagunes, R., Del Rosario-Arellano, L., Lee-Espinoza, H. E., Sierra-Macías, M., & Espinosa-

Calderón, A. (2018). Caracterización morfológica de poblaciones de chile manzano (*Capsicum pubescens* Ruiz & Pav.) en la región centro del estado de Veracruz, México. *Revista Bio Ciencias, 5*, e388. 11 p. https://doi.org/10.15741/revbio.05.e388

Li, Y. Q., y Wang, Z. H. (2021). Leaf morphological traits: Ecological function, geographic distribution and drivers. Chinese Journal of Plant Ecology, *45*(10): 1154-1172. https://doi.org/10.17521/cjpe.2020.0405.

Martín Martínez, I. (2001). *Conservación de recursos fitogenéticos* (Hojas Divulgadoras Núm. 2114 HD). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. https://mapa.gob.es

Martínez Estévez, M. (2019). Los chiles, su importancia más allá de tenerlos en la mesa. Desde el Herbario CICY, 11(1): 108-112. https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2019/2019-06-06-Martinez-Estevez-Los-chiles-su-importancia.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *Recursos fitogenéticos.* Comisión de Recursos Genéticos para la Alimentación y la Agricultura. https://www.fao.org/cgrfa/topics/plant-genetic-resources/es Fecha de consulta: 21 de julio del 2026.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2025). *FAODATA: Visualización de datos de producción.* https://fao.org Fecha de consulta: 21 de julio del 2026.

Osorio-Barraza, L. M., Manzur-Valdespino, S., Zafra-Rojas, Q. Y., Delgado-Olivares, L., Calderón-Ramos, Z. G., y Cruz Cansino, N. del S. (2021). Composición y aplicaciones clínicas de especies de chiles (Capsicum spp.) domesticados. Educación y Salud Boletín Científico Instituto de Ciencias de la Salud Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 10(19), 249–257. https://doi.org/10.29057/icsa.v10i19.7183

Palombo, N. E., & Carrizo García, C. (2022). Geographical patterns of genetic variation in locoto chile (*Capsicum pubescens*) in the Americas inferred by genome-wide data analysis. *Plants, 11*(21): 16 p. Artículo 2911. https://doi.org/10.3390/plants11212911

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020, 29 de junio). *Recursos fitogenéticos, seguridad alimentaria con futuro.* Gobierno de México. https://www.gob.mx/agricultura/articulos/recursos-fitogeneticos-seguridad-alimentaria-con-futuro Fecha de consulta: 21 de julio del 2026

Singh, S., Rani, M., Ghildiyal, S., y Madan, A. (2026). Genetic and Environmental Factors Influencing Pigment Production. En Biopigments of Microbial Origin: Innovations and Applications Across Industries. 65-75 p. CABI. https://doi.org

Tripodi, P., y Kumar, S. (2019). *The Capsicum crop: An introduction*. En N. Ramchiary y C. Kole (Eds.), The Capsicum genome. 1-8 p. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97217-6_1

Valdez Alfaro, I. A. (2017). *Caracterización fenotípica de quince accesiones de germoplasma de rocoto (Capsicum pubescens Ruiz y Pavón) en la estación INIA Santa Rita Arequipa* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. 160 p.

Wright, I. J., Dong, N., Maire, V., Prentice, I. C., Westoby, M., Díaz, S., Gallagher, R. V., Jacobs, B. F., Kooyman, R. M., Law, E. A., Leishman, M. R., Niinemets, Ü., Reich, P. B., Sack, L., Villar, R., Wang, H., y Wilf, P. (2017). Global climatic drivers of leaf size. Science, *357*(6354): 917-921. https://doi.org

Xingú-López, A., Espinoza-Gutierrez, D., Miranda-Gómez, J. M., Cruz-Gutierrez, J., & Pérez-González, C. K. (2025). *Capsicum pubescens*: Situación actual y tendencias futuras en el Estado de México. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, *13* (2): 115-121. https://doi.org/10.29057/icbi.v13iEspecial2.14636

Zou, X., & Zhu, F. (2022). Origin, evolution and cultivation history of the pepper. *Acta Horticulturae Sinica*, *49*(6): 1371-1381.

Recolección y caracterización de germoplasma de algodón (*Gossypium* sp.) del estado de Michoacán

Martha Elena Pedraza Santos[62], Claudia Pérez Mendoza[63], Ma. del Rosario Tovar Gómez[64], Héctor Acuña Acuña

Resumen

México es el centro de la diversidad del género *Gossypium* con 11 especies endémicas de las 13 especies diploides conocidas del hemisferio occidental. Con base en lo anterior, el objetivo de esta investigación fue: recolectar y documentar las especies silvestres y semidomesticadas de algodón (*Gossypium sp.*) existentes en el Estado de Michoacán. Durante el periodo de 2010 a 2014 se realizaron las actividades siguientes: a) recolección de germoplasma de algodón; b) pruebas de germinación de semillas de algodón; c) caracterización morfológica de accesiones de algodón. Los resultados relevantes que se obtuvieron hasta la fecha es que en el estado de Michoacán sobreviven plantas de algodón de las especies *G. aridum*, *G. hirsutum*, *G. lobatum* y G. *schwendimanii*, aunque la conservación de estos materiales locales está amenazada, porque el aumento de la población humana, la urbanización y apertura de nuevas tierras de cultivo han reducido gravemente la supervivencia de sus poblaciones. En cuanto a la caracterización morfológica, se seleccionaron 14 accesiones para su descripción morfológica, con base en las directrices para la ejecución del examen de la Distinción, la Homogeneidad y la Estabilidad de *Gossypium*. En las accesiones descritas de algodón silvestre en Michoacán, existe variabilidad fenotípica con características agronómicas de interés para su incorporación a un programa de mejoramiento genético.

Palabras clave: especies, *Gossypium*, recolección, germinación, caracterización morfológica.

[62] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)-Centro de Investigación Regional Centro. Campo Experimental Valle de México. Carretera Texcoco-los Reyes Km.13.5, Coatlinchán, Texcoco, CP. 56250, Estado de México, México. Correo electrónico: tovar.rosario@inifap.gob.mx; Autora para correspondencia: perez.claudia@inifap.gob.mx

[63] Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez". Paseo Gral. Lázaro Cárdenas y Berlín S/N, Colonia Viveros, Uruapan, CP. 60170, Michoacán, México. Correo electrónico: marelpesa@yahoo.com.mx

[64] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)-Centro de Investigación Regional Centro. Campo Experimental Valle de México. Carretera Texcoco-los Reyes Km.13.5, Coatlinchán, Texcoco, CP. 56250, Estado de México, México. Correo electrónico: tovar.rosario@inifap.gob.mx; Autora para correspondencia: perez.claudia@inifap.gob.mx

Abstract

Mexico is the center of diversity for the genus *Gossypium*, harboring 11 of the 13 known diploid species native to the Western Hemisphere. Based on this, the objective of this research was to collect and document wild and semi-domesticated cotton species (*Gossypium* spp.) found in the state of Michoacán. Between 2010 and 2014, the following activities were carried out: a) collection of cotton germplasm; b) cottonseed germination tests; and c) morphological characterization of cotton accessions. Key results obtained to date indicate that cotton plants belonging to the species *G. aridum*, *G. hirsutum*, *G. lobatum*, and *G. schwendimanii* still survive in Michoacán; however, the conservation of these local materials is threatened, as population growth, urbanization, and the opening of new agricultural lands have severely compromised the survival of their populations. Regarding morphological characterization, 14 accessions were selected for description based on guidelines for conducting Distinctness, Uniformity, and Stability (DUS) testing for *Gossypium*. The described wild cotton accessions from Michoacán exhibit phenotypic variability and agronomic traits of interest for incorporation into a genetic improvement program.

Keywords: species, *Gossypium*, collection, germination, morphological characterization.

Introducción

El género *Gossypium* pertenece a la familia *Malvaceae* y tribu *Gossypium*, incluye alrededor de 50 especies, de las cuales cuatro especies son tetraploides (2n = 4x = 52) y se cultivan por su fibra y el resto de las 46 especies son diploides (2n = 2x = 26) (Fryxell, 1992; Percival *et al.*, 1999). Estas especies se distribuyen a lo largo de los trópicos y subtrópicos del mundo en forma silvestre y semidomesticada (Ulloa *et al.*, 2006).

Percival y Kohel (1990), mencionan que existe una amplia variación genética entre las diferentes especies silvestres y semidomesticadas de *Gossypium* ya que son una fuente importante por sus características que presentan y que pueden ser útiles en un programa de mejoramiento genético para generar variedades con esterilidad masculina citoplasmática, mejorar la calidad y el rendimiento de fibra, resistencia a estrés bióticos y abióticos, etc (Ulloa, 2014). Sin embargo, toda esa variabilidad genética se localiza en los recursos genéticos de *Gossypium* que se encuentran dispersos en los centros de origen de este género.

A principios del siglo veinte investigadores de los Estados Unidos, Rusia, Francia y China realizaron algunas expediciones (Percival *et al.*, 1999) por los centros de origen de *Gossypium* entre los que se encuentra México con el fin, de recolectar y conservar los recursos genéticos del algodón nativo ya que el éxito de la investigación genética, citogenética y taxonomía de esos países, dependen en gran parte de la disponibilidad de variabilidad genética existente de *Gossypium* (Ulloa *et al.*, 2006).

México es el centro de origen del algodón cultivado (*Gossypium hirsutum*) y de la gran diversidad genética de especies silvestres diploides (*armourianum, lobatum, gossypioides, aridum, laxum, schwendimanii, thurberi, trilobum, davisonii, turneri y harknesii*) (Ulloa *et al.*, 2006; Feng *et al.*, 2011; Ulloa *et al.*, 2013). En el estado de Michoacán se tienen reportes sobre la existencia de tres especies de algodón (*G. hirsutum, G. lobatum* y *G. schwendimanii*).

A pesar de que nuestro país es el centro de origen de *Gossypium hirsutum* de la especie más cultivada en el mundo los trabajos de investigación eran limitados (Pérez *et al*., 2013) que se enfocaran a la conservación *ex situ* e *in situ*, caracterización en campo (morfológica y agronómica) y en laboratorio (bioquímica y molecular) de las especies de *Gossypium* como lo existe en otros países. En ese contexto, el año 2009 se crea la Red de Algodón del Sistema Nacional de los Recursos Fitogenéticos (SINAREFI) con el objetivo, de realizar investigación básica sobre los recursos genéticos silvestres del algodón con los que cuenta México. Con base en lo anterior, el objetivo de esta investigación fue: recolectar y documentar las especies silvestres y semidomesticadas de algodón (*Gossypium sp.*) existentes en el estado de Michoacán.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo durante el periodo 2010 a 2014, en el cual se realizaron las siguientes actividades:

Recolección de germoplasma de algodón

Se realizaron visitas al herbario del Instituto de Ecología (INECOL) esto, con el objetivo de localizar información de especímenes silvestres o semi-domesticados de algodón que hayan sido recolectados en el área que abarca el estado de Michoacán. Posteriormente, se realizaron recorridos por los municipios de Aguililla, Apatzingán, Aquila, Arteaga, Briseñas, Buenavista, Carácuaro, Chinicuila, Churumuco, Coalcomán, Gabriel Zamora, La Huacana, Hidalgo, Huetamo, Ixtlán, Jiquilpan, Lázaro Cárdenas, Mújica, Nocupétaro, Nuevo Urecho,

Parácuaro, San Lucas, Tacámbaro, Tancítaro, Taretán, Tiquicheo, Tumbiscatío, Tuzantla, Tztzio, Vista Hermosa y Ziracuaretiro, del estado de Michoacán para la localización de ejemplares silvestres y semidomesticados de algodón (*Gossypium sp.*). Cada accesión se recolectó muestras de ramas, hojas, flores y frutos y se herborizaron para facilitar la identificación botánica de los ejemplares. Durante la recolección de las accesiones, se tomó la ubicación geográfica y los datos necesarios para el llenado de los formatos de los datos pasaporte.

Germinación de semillas

Se utilizaron semillas de algodón silvestre (*G. hirsutum*) colectadas en el Estado de Michoacán. Las semillas se desinfectaron con hipoclorito comercial 40% v/v y agua estéril por 15 minutos y se sometieron a 88 tratamientos conformados por 11 niveles de temperatura de incubación de las semillas (20 a 40 °C en intervalos de 2 °C) más cuatro tiempos de imbibición en agua (0, 1, 2 y 3 horas) y dos posiciones de las semillas en la caja petri (sobre y entre papel filtro húmedo) (Figura 1).



Figura 1. Proceso para la germinación de semillas de algodón silvestre y registro de variables.

La unidad experimental consistió en una semilla con diez repeticiones por tratamiento colocadas en cajas petri. Después de alcanzar el máximo porcentaje de germinación, registrado diariamente, se evaluaron las variables número de semillas germinadas, la longitud y diámetro de la radícula más hipocótilo (Figura 1). Para el análisis de las variables del estudio de germinación, se utilizó el programa *Statistical Analysis Sistem* versión 9.0 (SAS, 2000). Para hacer el análisis de varianza, la comparación de medias de los tratamientos se realizó mediante la prueba de Tukey ($P<0.05$).

Caracterización morfológica

Se estableció una colección de trabajo en la población de Gabriel Zamora, municipio de Michoacán. Por lo anterior, se utilizaron 14 accesiones para efectuar la caracterización morfológica. Para ello, se establecieron cinco plantas de cada una de las accesiones de algodón silvestre a una distancia entre plantas fue de 3 x 3 m bajo un diseño tresbolillo. Se efectuaron labores de deshierbe y control de plagas y enfermedades. Se registraron 29 caracteres morfológicos de importancia. Los caracteres evaluados se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Extracto de las variables evaluadas para la caracterización morfológica de accesiones de *Gossypium hirsutum*. Periodo, 2012-2014.

Órgano	Variables	
	Cualitativas	Cuantitativas
Planta	Tipo de floración Forma Densidad del follaje	Numero de nudos hasta la rama fructífera inferior Altura
Flor	Color del pétalo Color del polen Posición del estigma en relación a las anteras	
Hoja	Intensidad del color verde Forma Pubescencia en el envés Nectarios	Tamaño
Tallo	Pubescencia Color	
Bráctea	Dentado	Tamaño

Fuente: UPOV (2001).

La toma de datos para las variables estudiadas se realizó de la siguiente manera: todas las mediciones cuantitativas se realizaron en centímetros con un flexómetro, excepto tamaño de la hoja y bráctea que se midieron en centímetros cuadrados con el integrador de área foliar (Cl-202 Portable Laser Leaf Area Meter). Las variables cualitativas se midieron con base en la observación directa. El color de los órganos florales de las plantas se registró de acuerdo con las cartas de la Royal Horticultural Society (RHS) y para los órganos vegetativos se registró con las cartas de colores de Munsell.

Resultados y discusión

Recolección de germoplasma de algodón

Se recolectaron un total de 150 accesiones de algodón silvestre en 34 Municipios del Estado de Michoacán. La especie predominante en el Estado fue *Gossypium hirsutum* (90.7%). Es importante comentar, que se recolectó germoplasma de las especies silvestres endémicas que solamente se encuentran en Michoacán de *G. lobatum* (6.7%) y *G. schwendimanii* (2.6%). Esta información coincide con la información reportada por Ulloa *et al.,* (2006), Pérez *et al.,* (2011) quienes mencionan la presencia de *G. hirsutum*, *G. lobatum* y *G. schwendimanii* en Michoacán; por lo que debe tomarse en cuenta esta información, en la toma de decisiones para evitar la liberación de variedades transgénicas de algodón en el estado de Michoacán.

Por otra parte, el germoplasma de algodón se distribuyó desde climas tropical, cálido subhúmedo y templado, todos ellos con lluvias en verano. En el estado de Michoacán se localizaron plantas de algodón en regiones con temperaturas que oscilan de los 8 °C hasta los 54 °C. Estos ecotipos se desarrollan en altitudes de 230 m como en la localidad de Cupuan del Rio, hasta los 1483 msnm en la localidad del Predio “El Cerrito”, en Ziracuaretiro. El rango de latitud fue de los 18° 30’ a los 19° 30’ y el de longitud de 101° 00’ hasta los 103° 30’ (Figura 1).

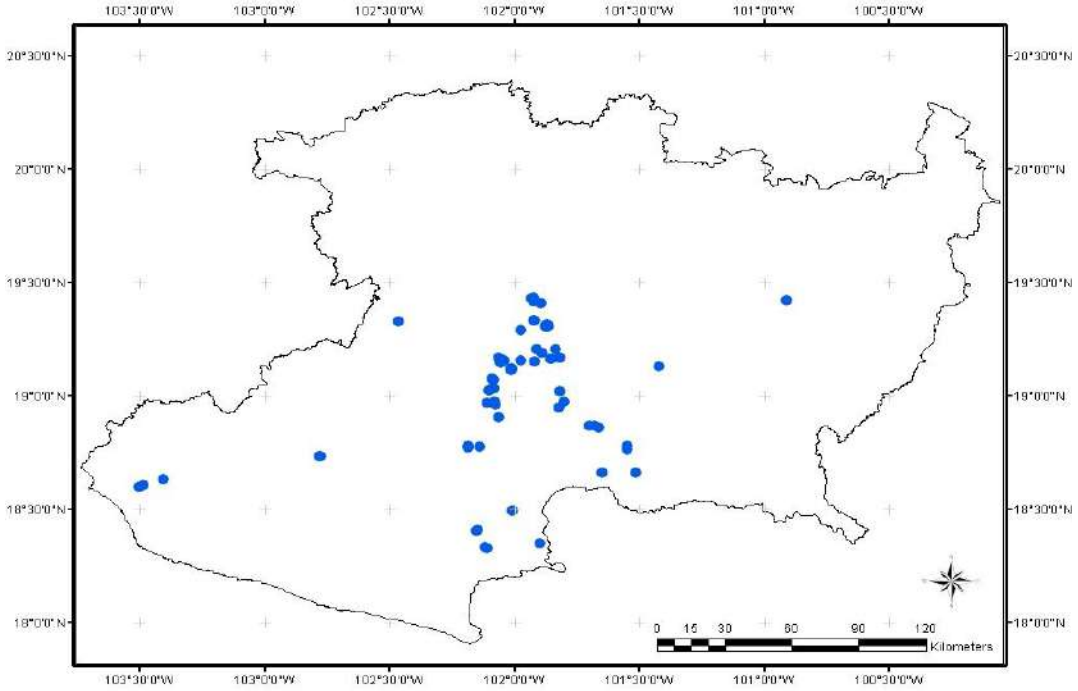


Figura 2. Municipios del Estado de Michoacán en donde se ha colectado germoplasma de algodón silvestre y semidomesticado.

Durante los viajes exploratorios realizados en las diversas regiones ecogeográficas de Michoacán se observó, que todavía persisten en forma silvestre plantas de algodón perennes de tipo arbustivo cuya semilla presenta fibra corta, escasa o ausente. Estas plantas mantienen características de adaptación al medio ambiente que bien podría incorporarse a los algodones comerciales y ofrecer una alternativa muy valiosa a los programas de mejoramiento genético (Pedraza *et al.*, 2012).

Germinación de semillas

El mayor porcentaje de germinación (100%) se obtuvo a 30 °C en semillas sin imbibir y colocadas sobre papel filtro húmedo. Este resultado coincide con el obtenido por Krzyzanowski y Delouche (2010) en *G. hirsutum*, en el cual las temperaturas óptimas para la germinación oscilaron entre los 28 y 30 °C; además, la velocidad de germinación tuvo un aumento proporcional del 47 al 96% al incrementarse la temperatura de 15 a 30 °C de acuerdo a un estudio realizado por Tort *et al.*, (1996).

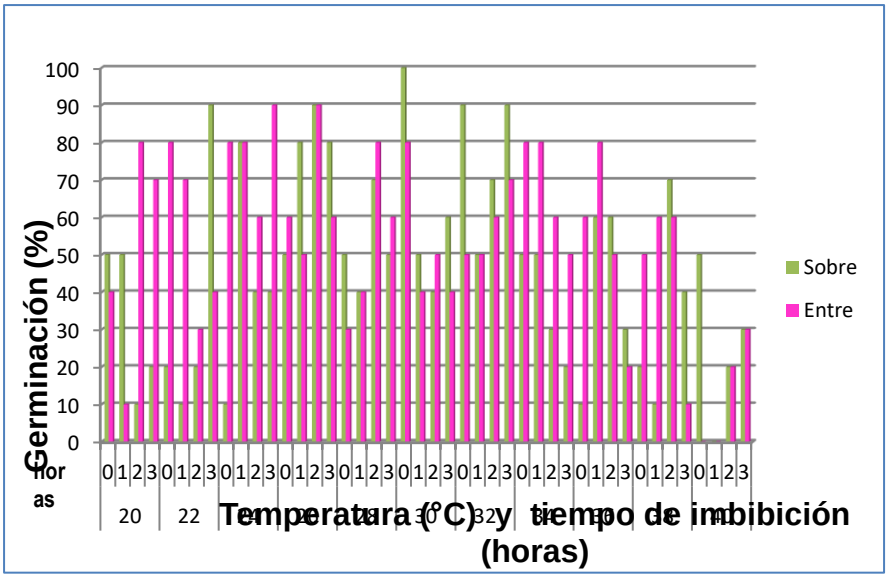


Figura 3. Influencia de la temperatura, tiempo de imbibición y cubierta sobre la germinación en semillas de algodón silvestre.

La germinación de semillas se redujo a 40 °C y no ocurrió cuando éstas se imbibieron durante una hora en agua. Este efecto se ha documentado en diversas variedades de *Gossypium hirsutum* en donde la germinación se inhibe a 40 °C y se incrementa a 30 °C (Krzyzanowski y Delouche, 2011). El diámetro de la radícula más el hipocótilo fue superior a 32 y 34 °C (2.12 y 2.09 mm, respectivamente) aunque su longitud fue mayor en plántulas obtenidas a 26 y 28°C (69.3 y 68.9 mm). La colocación de semillas entre papel filtro húmedo mejoró la longitud de la radícula más hipocótilo (46.4 mm), contrario a lo ocurrido en la germinación de semillas de maíz (*Zea mays*), frijol (*Phaseolus vulgaris*) y algodón (*Gossypiun hirsutum*) en donde no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los métodos de germinación con papel enrollado y sin enrollar (Méndez *et al*., 2008).

Aunque las semillas de las accesiones evaluadas son originarias de regiones áridas de Michoacán, las plántulas obtenidas de semillas incubadas a 40 °C disminuyeron en 52% el diámetro y 88% la longitud de la radícula más hipocótilo, con respecto al mejor tratamiento, lo que demuestra la sensibilidad del algodón a temperaturas tan elevadas en sus primeras etapas de desarrollo (Gutiérrez *et al.*, 2013).

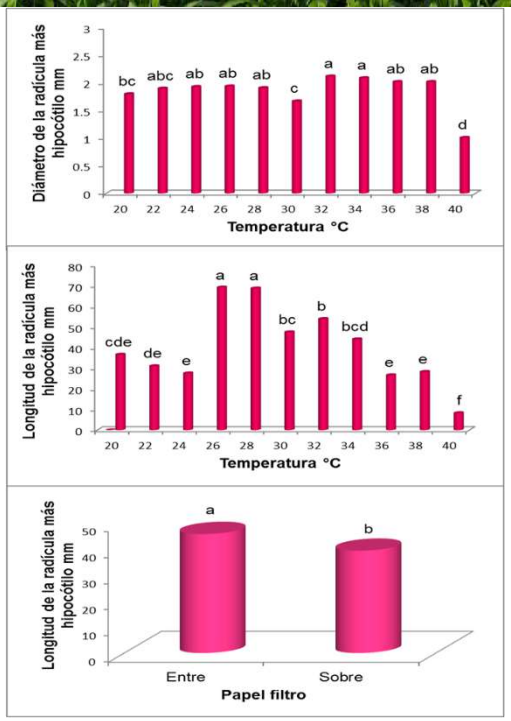


Figura 4. Relación de la temperatura y el papel filtro húmedo con el diámetro (A), longitud (B) de la radícula e hipocótilo.

Caracterización morfológica

De las 14 accesiones estudiadas, el 79% fueron plantas de forma globosa y 21% de forma cónica mientras que la forma cilíndrica que mencionan los descriptores de la UPOV para algodón TG/88/6 (2001), no se observó en los genotipos silvestres recolectados. La densidad del follaje del 21% de los materiales fue densa, 43% de densidad media y 36% de follaje laxo.

Las flores de todos los ejemplares estudiados fue amarillo (YG 2D, GYG 1D, YG 2C, YG 4B, GYG 1C, YG 2B y GYG 1B con las cartas de colores de la Royal Horticultural Society), 15.4% con mancha color púrpura muy fuerte (Red Group 53A y Red Purple Group 59B), 7.7% con mancha fuerte (Red Group 46A) y 76.9% sin manchas. El polen de color crema (69.2%), amarillo (7.7%) y amarillo oscuro (23.1%). La intensidad de color verde de la hoja oscuro 38.5% (5GY 5/6, 7.5GY 5/6), media 38.5% (7.5GY 5/4, 5GY 4/6, 5GY 4/4) y clara 23.1% (7.5GY 4/4 y 7.5GY 3/4).

La forma de la hoja presentó que el 21% fue palmada-digitada y 79% palmada. El 7% de los ecotipos no presentaron pubescencia en el envés de la hoja, 36% presentaron pubescencia débil, 36% media y 21% fuerte; no se encontraron plantas consideradas en la categoría de "pubescencia muy fuerte" esto, de acuerdo con los descriptores de la UPOV (2001). La forma de la hoja y grado de pubescencia en el envés de plantas de algodón silvestre de Michoacán se observaron los siguientes niveles de caracteres: a) forma palmada, b) forma palmada-digitada mientras, que en el grado de pubescencia los niveles de caracteres fueron los siguientes: c) ausente, c) débil, e) media y f) fuerte.

En el color de la hoja se registraron siete tonalidades distintas de verde (5GY 5/6, 7.5GY 5/6, 7.5GY 5/4, 5GY 4/6, 5GY 4/4, 7.5GY 4/4 y 7.5GY 3/4), de acuerdo a las cartas de colores de Munsell. En la Figura 5, se muestra el porcentaje con su respectivo color del tallo encontrados con las cartas de colores de Munsell en las accesiones de algodón silvestre en el Estado de Michoacán. Los colores encontrados están entre café y café grisáceo (7.5YR 6/2, 7.5YR 5/2, 2.5YR 5/2, 5YR 5/2, 10R 5/2 y 7.5YR 4/2).

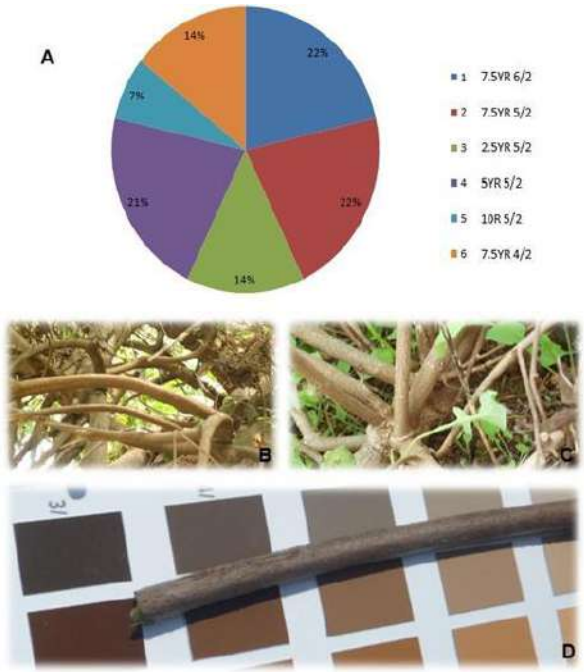


Figura 5. Color del tallo de los genotipos silvestres de algodón (*Gossypium hirsutum*) colectados en el estado de Michoacán.

En cuanto a los nectarios en las hojas, el 100% de las accesiones presentaron nectarios, algunas con estas estructuras muy marcadas y otras, poco marcadas. Estas estructuras por una parte no son deseables porque contienen gosipol que es una sustancia tóxica para los mamíferos entre ellos el humano, y aunque hay algunos roedores que toleran esta sustancia, en exceso también para ellos es tóxico; y por otra parte son deseables ya que ayudan a la planta en la resistencia natural al ataque de insectos (León, 2000). Al medir la pubescencia del algodón nativo del estado de Michoacán se encontraron tallos con ausencia en un 21%, pubescencia débil 36%, media 29% y fuerte con 14%.

Se observó los tres tipos de floración con porcentajes muy similares: agrupada (31%), semiagrupada (38%) y no agrupada (Figura 6).

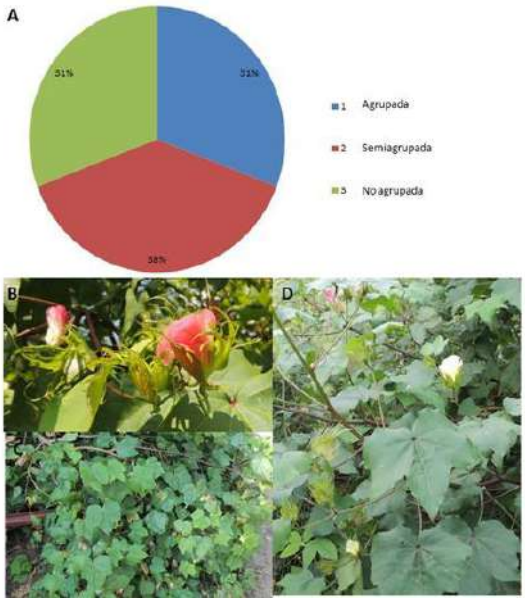


Figura 6. Tipo de floración en *Gossypium hirsutum*.

El polen presentó tres colores diferentes. El de mayor porcentaje fue crema (69%), en segundo lugar, fue el polen amarillo oscuro con un 23% y el color amarillo claro fue el de menor porcentaje (8%). En los genotipos silvestres se presentaron tres tipos de posición del estigma en relación a las anteras que se menciona en los descriptores de la UPOV. El 7% por debajo (b), el 21% al mismo nivel (c) y el 72% (c) presentan el estigma por encima de las anteras (Figura 7).

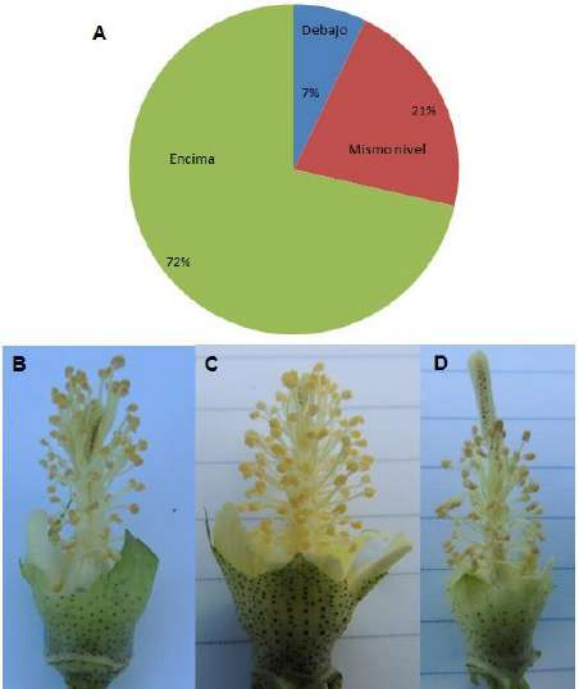


Figura 7. Posición del estigma en relación a las anteras.

En total de las accesiones estudiadas los pétalos fueron amarillos con siete tonalidades distintas. Del más claro al más oscuro fueron (YG 2D, GYG 1D, YG 2C, YG 4B, GYG 1C, YG 2B y GYG 1B) de acuerdo con las cartas de la Royal Horticultural Society (RHS). En la siguiente gráfica se encuentran los distintos amarillos encontrados con su respectivo porcentaje (Figura 8).

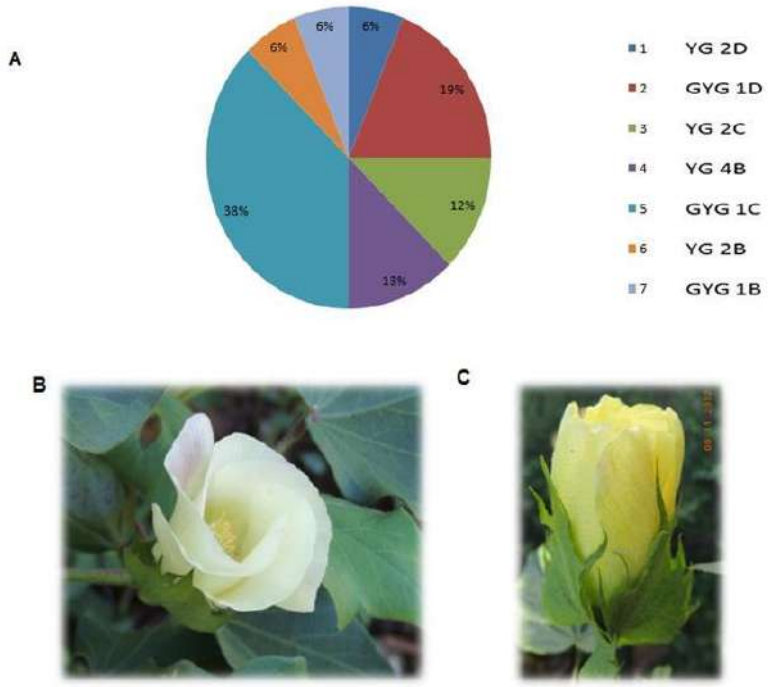


Figura 8. Color del pétalo encontrado en genotipos de *Gossypium hirsutum* en el Estado de Michoacán.

El dentado de bráctea según la UPOV puede ser fina, medio y/o profundo. Del total de los genotipos de algodón silvestre 15% presentaron dentado fino en las brácteas, 39% dentado profundo y 46% dentado medio.

Conclusiones

La especie con mayor número de accesiones recolectadas fue *Gossypium hirsutum*.
Las especies endémicas que se recolectaron en este estudio fueron: *G. lobatum* y *G. schwendimanii*.
La temperatura constituyó el factor principal para la germinación de semillas de algodón nativo.

Existe diversidad morfológica entre las 14 accesiones de *Gossypium hirsutum* de Michoacán, con lo que se contribuye al conocimiento de la diversidad genética en Michoacán para este género.

Existe variabilidad fenotípica en las accesiones de algodón silvestres *Gossypium hirsutum* del estado de Michoacán.

Agradecimientos

Los autores desean expresar sus agradecimientos al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y a la Secretaria de Agricultura (SADER), que a través del entonces Sistema Nacional de Recursos Fitogenéticos (SINAREFI)-SNICS otorgaron el apoyo económico para las actividades de investigación en el germoplasma de algodón nativo de México.

Literatura citada

Feng, Ch.; M. Ulloa; C. Perez-M. & J. McD. Stewart. (2011). Distribution and molecular diversity of arborescent *Gossypium* Species. *Botany* 89 (9): 615-624.

Fryxell, P. A. (1992). A revised taxonomic interpretation of *Gossypium* L. (*Malvaceae*). *Rheedea* 2: 108-165.

Gutiérrez, V. M.; M. E. Pedraza S.; F. Carrillo Q. & C. Pérez M. (2013). Estudios sobre la germinación de semillas de algodón silvestre (*Gossypium hirsutum* L.) de Michoacán. *Memoria del 8 Congreso Estatal de Ciencia y Tecnología e Innovación.* p: 1097-1102.

Hartmann, H. y D. Kester. (2001). Propagación de plantas. Principios y prácticas. 8ª Reimpresión. Editorial Continental. México. 760 p.

Krzyzanowski, F. C. & J. C. Delouche. (2011). Germination of cotton seed in relation to temperatura. *Revista Brasileira de Sementes* 33 (3): 543-548.

León, J. (2000). Botánica de los cultivos tropicales. Ed. Agroamérica. 522 p.

Méndez, N. J.; J. F. Merazo; M. Z. Zerpa & C. E. Bolívar. (2008). Efecto de la colocación de semillas maíz (*Zea mays* L.*)*, caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) y algodón (*Gossypiun hirsutum* L.*)* en papel toallín (enrrollado y sin enrollar) sobre la germinación y el vigor. *Revista UDO Agrícola* 8 (1): 67-71.

Pedraza, S. M. E.; C. Pérez M.; V. W. Steinmann; F. Carrillo Q.; M. R. Tovar G.; Q. Obispo G.; L. Tavitas F. & M. Flores Z. (2012). Colecta de Algodón (*Gossypium hirsutum*) nativo en el estado de Michoacán. *Memoria de resúmenes de carteles de la 1er Feria de la Agrodiversidad y Agroproductos.* p: 37.

Percival, A. E.; J. E. Wendel & J.M. Stewart. (1999). Cotton: origin, History, Technology, and Production. John Wiley & Sons.

Percival, A. E. & R. J. Kohel. (1990). Distribution, collection and evaluation of *Gossypium*. In: N. C. Brady (ed). Advances in agronomy. Academy Press. Inc., American Society of Agronomy. (44): 225-256.

Pérez, M. C.; M. R. Tovar G.; F. Aragón C.; L. Tavitas F.; M. E. Pedraza S.; J. O. Mijangos C.; M. Flores Z.; Q. Obispo G.; J. F. Enríquez Q.; B. Tovar G. & M. Mata M. (2013). Recolección, caracterización y uso de los recursos genéticos del algodón. [Resumen] *Memoria del XV Congreso Nacional y I Internacional de Ciencias Agronómicas.* p: 580-581.

Pérez, M., C.; M. R. Tovar G.; Q. Obispo G.; J. A. Ruíz C.; L. Tavitas F. & J. L. Jolalpa B. (2011). Los recursos genéticos del algodón en México. Libro Técnico. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. 120 p.

S.A.S. SAS/STAT. (2000). Guide for personal computers. Statical Analysis System Institute. Inc. Cary, NC. USA.

Tort, N.; F. Fakultesi & B. Izmir. (1996). Effects of light, different growth media, temperature and salt concentrations on germination of cotton seeds *(Gossypium hirsutum* L. cv nazilli 87. *Journal of agronomy and crop science* 76 (4): 217-287.

Ulloa, M.; I. Y. Abdurakhmonov; C. Pérez M.; R. Percy & J. Stewart. (2013). Genetic diversity and population structure of cotton (*Gossypium spp.*) of the new world assessed by SSR Markers. *Botany* 91 (4): 251-259.

Ulloa, M.; J. McD. Stewart; E. A. García C.; S. Godoy A.; A. Gaytán M. & S. Acosta N. (2006). Cotton genetic resources in the western states of México: i*n situ* conservation status and germplasm collection for *ex situ* preservation. *Genetic Resources and Crop Evolution* 53 (4): 653-668.

Union for the Protection of new Varieties of plant (UPOV). (2001). Directrices para la ejecución del examen de la distinción, la homogeneidad y la estabilidad. Algodón. [En línea]. Disponible en http://www.upov.int/es/about/upov_convention.htm

Relación entre la emisión de radícula y el porcentaje de plántulas normales en trigo en una prueba de germinación estándar

Paola Abigail Carmona Huesca[65]. Natanael Magaña Lira[66]. Patricia Landa Salgado[67]

Resumen

El trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) es un cultivo de relevancia socioeconómica en México, por lo que disponer de semillas de calidad es fundamental para garantizar la productividad agrícola. Existen diversas pruebas para evaluar calidad; sin embargo, el tiempo requerido para obtener resultados puede retrasar los procesos de certificación. El objetivo del presente estudio fue evaluar, mediante una prueba de germinación estándar, la relación entre la emergencia temprana de radícula y el porcentaje final de plántulas normales, con la finalidad de determinar su potencial como indicador temprano de calidad fisiológica. El experimento se realizó en el Laboratorio de Semillas de la Universidad Autónoma Chapingo. Se evaluaron 14 variedades de trigo bajo un diseño completamente al azar, siguiendo las Reglas Internacionales para el Análisis de Semillas (ISTA), mediante la prueba de germinación estándar entre papel. Se realizaron conteos diarios de semillas germinadas y evaluaciones de plántulas normales, anormales y semillas no germinadas en los días 4 y 8. Los resultados mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.01$) entre variedades para la mayoría de las variables evaluadas. Todas las variedades superaron el 90 % de germinación al cuarto día. Se identificaron correlaciones positivas y significativas entre los conteos tempranos de germinación y el porcentaje final de plántulas normales, con coeficientes de correlación entre 0.464 y 0.489 ($p \leq 0.01$). Aunque la emergencia temprana de radícula mostró asociación con la producción final de plántulas normales, la magnitud de las correlaciones no permitió desarrollar un modelo predictivo para estimar el comportamiento final de las semillas.

Palabras clave: radícula, calidad fisiológica, semilla de trigo.

Abstract

[65] Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México–Texcoco. Chapingo, Estado de México, C. P. 56230. México, abi.carmona97@gmail.com
[66] Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México–Texcoco. Chapingo, Estado de México, C. P. 56230. México. nmaganal@chapingo.mx
[67] Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México–Texcoco. Chapingo, Estado de México, C. P. 56230. México. plandas@chapingo.mx

Bread wheat (*Triticum aestivum* L.) is a crop of major socioeconomic importance in Mexico, and the availability of high-quality seed is essential to ensure agricultural productivity. Several tests are available to evaluate seed quality; however, the time required to obtain results may delay certification processes and decision-making in the seed industry. The objective of this study was to evaluate, through a standard germination test, the relationship between early radicle emergence and the final percentage of normal seedlings, to determine its potential as an early indicator of seed physiological quality. The experiment was conducted at the Seed Laboratory of the Autonomous University of Chapingo. Fourteen wheat varieties were evaluated under a completely randomized design following the International Seed Testing Association (ISTA) Rules for standard germination tests using the between-paper method. Daily counts of germinated seeds were performed, and normal seedlings, abnormal seedlings, and non-germinated seeds were evaluated on days 4 and 8 after test establishment. Significant differences ($p \leq 0.01$) were detected among varieties for most of the variables evaluated. All varieties exceeded 90 % germination by the fourth day of evaluation. Positive and significant correlations were also found between early germination counts and the final percentage of normal seedlings, with correlation coefficients (r) ranging from 0.434 to 0.489 ($p \leq 0.01$). Although early radicle emergence was associated with the final production of normal seedlings, the magnitude of the correlations was insufficient to develop a predictive model capable of accurately estimating the final seed performance.

Keywords: radicle, physiological quality, wheat seed.

Introducción

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es uno de los cereales de mayor importancia a nivel mundial debido a su contribución a la alimentación humana y a la seguridad alimentaria. Este cultivo constituye una de las principales fuentes de energía y proteína para la población, además de representar una actividad económica relevante dentro de los sistemas agrícolas de numerosos países. En México, el trigo ocupa una posición estratégica por su participación en la industria molinera y alimentaria, siendo la calidad de la semilla uno de los factores determinantes para alcanzar rendimientos elevados y una producción estable (Vásquez, 2018).

La calidad de las semillas comprende atributos genéticos, fisiológicos, físicos y sanitarios que influyen directamente en el establecimiento del cultivo y en la productividad agrícola (García et al., 2016). Entre estos atributos, la calidad fisiológica es especialmente importante debido a que determina la capacidad de las semillas permite garantizar y producir plántulas

vigorosas bajo diferentes condiciones ambientales. En consecuencia, la evaluación de la calidad fisiológica constituye una etapa fundamental dentro de los programas de producción y certificación de semillas.

La certificación de semillas tiene como finalidad garantizar que los materiales comercializados cumplan con estándares mínimos de calidad previamente establecidos. En México, este proceso es regulado por el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS), organismo encargado de supervisar la producción, certificación y comercialización de semillas. Dentro de los criterios considerados para la certificación, la germinación representa uno de los parámetros más
importantes, ya que permite estimar la capacidad de una semilla para producir una plántula normal bajo condiciones favorables.

Las pruebas de germinación estándar se realizan siguiendo protocolos establecidos por la ISTA, con el propósito de obtener resultados reproducibles y comparables entre laboratorios. Sin embargo, estas pruebas requieren varios días para completarse, lo que puede representar limitaciones operativas y retrasar la toma de decisiones dentro de los procesos de certificación y comercialización de semillas. Por ello, existe interés en identificar indicadores tempranos que permitan estimar la calidad fisiológica de las semillas antes de finalizar la prueba convencional.

Diversos estudios han señalado que la emergencia temprana de radícula constituye uno de los primeros eventos visibles del proceso germinativo y puede estar asociada con el vigor de las semillas. Guan et al. (2018) reportaron que los conteos tempranos de emergencia de radícula presentaron asociación con la capacidad de establecimiento de plántulas en trigo, sugiriendo su potencial como indicador rápido de vigor. De manera similar, Morales (2019) y González (2021) encontraron relaciones significativas entre la emergencia temprana de radícula y el porcentaje final de plántulas normales en avena y cebada, respectivamente.

No obstante, la información disponible sobre esta relación en variedades de trigo utilizadas en programas de certificación en México es limitada. Por ello, el objetivo del presente estudio fue evaluar la relación entre la emergencia temprana de radícula y el porcentaje final de plántulas normales en trigo (*Triticum aestivum* L.), con la finalidad de determinar su potencial como indicador temprano de calidad fisiológica y su posible aplicación en la optimización de las pruebas de germinación estándar.

Materiales y métodos

Localización. El estudio se realizó en el Laboratorio de Semillas del Departamento del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo ubicada en Texcoco de Mora, Estado de México (19°29' N, 98°51' O; 2250 m de altitud).

Material genético. Se utilizaron semillas de 14 variedades de trigo (*Triticum aestivum* L.), proporcionadas por el programa de Cereales de Grano Pequeño del Campo Experimental del Valle de México del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Forestales y Pecuarias (INIFAP). Los materiales evaluados fueron identificados como: VAR-1, VAR-2, VAR-3, VAR-4, VAR-5, VAR-6, VAR-7, VAR-8, VAR-9, VAR-10, VAR-11, VAR-12, Nana F2007 y Valles F2015. Previamente al establecimiento del experimento, las semillas de cada variedad fueron seleccionadas de manera aleatoria, procurando uniformidad en tamaño, forma y apariencia física, con el fin de reducir la variabilidad asociada a daños mecánicos o diferencias visibles de calidad.

Diseño experimental. El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con 14 variedades de trigo y cuatro repeticiones por tratamiento. Cada repetición estuvo constituida por
100 semillas distribuidas en dos tacos de 50 semillas cada uno, para un de 400 semillas evaluadas por variedad.

Metodología de la Prueba de Germinación. La prueba de germinación se realizó de acuerdo con las Reglas Internacionales para el Análisis de Semillas de la ISTA (2024), utilizando el método de germinación estándar entre papel enrollado.
Las semillas se distribuyeron uniformemente sobre toallas de papel previamente humedecidas con agua destilada y colocaron en disposición alternada para favorecer el desarrollo de las plántulas. Posteriormente, se cubrieron con una segunda hoja de papel humedecida y se enrollaron formando los tacos correspondientes.

Los tacos fueron colocados verticalmente dentro de bolsas de polietileno y distribuidos aleatoriamente en bandejas de plástico. Las bandejas se incubaron en una cámara de germinación Seedburo® bajo condiciones controladas de temperatura (20 °C) y humedad relativa (90 %) durante ocho días.
Se realizaron conteos diarios de semillas germinadas durante todo el periodo de evaluación. Asimismo, las plántulas normales, plántulas anormales y semillas no germinadas fueron evaluados a los días 4 y 8 después del establecimiento de la prueba, conforme a los criterios establecidos por la ISTA (2024) para semillas de trigo (*Triticum aestivum* L. *subsp. aestivum*).

Variables Evaluadas

Porcentaje de germinación (G). Se consideraron como germinadas aquellas semillas que presentaron emergencia de radícula. Los conteos de germinación se realizaron diariamente y para el análisis se utilizaron los porcentajes correspondientes a los días 2, 3, 5, 6 y 7, identificados como GD2, GD3, GD5, GD6 y GD7, respectivamente. El porcentaje de germinación se calculó mediante la ecuación:

$$G\ (\%)=\left(\frac{\text{Número de semillas germinadas}}{\text{Número de semillas de la unidad experimental}}\right).100 \quad (1)$$

Semillas No Germinadas (NG). Se registró el porcentaje de semillas que no presentaron emergencia de radícula al momento de la evaluación. Los resultados correspondientes a los días 4 y 8, se identificaron como NGD4 y NGD8.
Plántulas Normales (N). Se consideraron normales aquellas plántulas que desarrollaron adecuadamente sus estructuras esenciales de acuerdo con los criterios establecidos por la ISTA, (2024). Los conteos realizados a los días 4 y 8 se identificaron como ND4 y ND8.
Plántulas Anormales (A). Se contabilizaron las plántulas que presentaron alteraciones en sus estructuras esenciales, tales como malformaciones, desarrollo desproporcionado, daños o síntoma de enfermedad que pudieran limitar su crecimiento normal (ISTA, 2024). Los resultados obtenidos a los días 4 y 8 se identificaron como AD4 y AD8.

Análisis Estadístico. Los datos obtenidos en la prueba de germinación se analizaron bajo un diseño completamente al azar mediante un análisis de varianza (ANOVA). Cuando se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, se realizó una comparación de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Adicionalmente, se efectuó un análisis de correlación de Pearson para determinar el grado de asociación entre las variables evaluadas. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa Statistical Analysis System (SAS Institute, Cary, NC, USA) versión 9.4.
Debido a que algunas variables fueron expresadas en porcentaje, previamente se aplicó una transformación arcoseno de raíz cuadrada con el fin de aproximar los datos a una distribución normal y cumplir los supuestos del análisis de varianza. La transformación se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$yt_{ij} = arcosen\sqrt{\frac{x_{ij}}{100}} * \frac{180}{\pi} \quad (2)$$

donde:
Y_{ij} = valor transformado
X_{ij} = valor porcentual observado
π = constante matemática

Resultados y discusión

Análisis de varianza

Los resultados del análisis de varianza para las variables evaluadas en la prueba de germinación (Cuadro 1) mostraron diferencias altamente significativas ($p \leq 0.01$) entre variedades para la mayoría de las variables analizadas, incluyendo el porcentaje de semillas germinadas a los días 2, 3, 5, 6 y 7 (GD2T, GD3T, GD5T, GD6T y GD7T), así como para el porcentaje de plántulas normales y semillas no germinadas evaluadas durante la prueba. Estos resultados evidencian la existencia de variabilidad genética entre las variedades estudiadas en cuanto a su capacidad germinativa y calidad fisiológica. Las diferencias observadas entre indican respuestas fisiológicas contrastantes durante el proceso de germinación, lo que pone de manifiesto la importancia del componente genético en la expresión de la calidad de la semilla.

Cuadro 5. Cuadrados medios y coeficientes de variación obtenidos en el análisis de varianza de variables de germinación en semillas de 14 variedades de trigo (*Triticum aestivum* L.).

FV	GL	GD2T	GD3T	NDT4	GD5T
VAR	13	340.44 **	83.41 **	78.56 **	81.77 **
Error	42	23.43	10.59	8.87	9.29
TOTAL	55				
CV		7.21	4.04	3.81	3.70

		GD6T	GD7T	ND8T
VAR	13	71.36 **	68.36 **	90.71 **
Error	42	10.29	11.65	14.74
TOTAL	55			
CV		3.88	4.12	5.42



FV = fuente de variación; VAR = variedad; GL = grados de libertad; CV = coeficiente de variación; GD2T, GD3T, GD5T, GD6T y GD7T = porcentaje de semillas germinadas en los días 2, 3, 5, 6 y 7, respectivamente (datos transformados); ND4T y ND8T = porcentaje de plántulas normales (datos transformados); ** indica significancia estadística a $p \leq 0.01$. T = datos transformados mediante la transformación arcoseno de raíz cuadrada.

Los coeficientes de variación (CV) oscilaron entre 3.70 % y 60.26 %. Los menores valores se registraron en las variables relacionadas con el porcentaje de germinación, particularmente GD3T, GD6T y GD7T, cuyos coeficientes inferiores al 5 %, indicando una adecuada precisión experimental y una alta consistencia entre repeticiones.

Por el contrario, las variables asociadas con plántulas anormales y semillas no germinadas (AD4T, NGD4T, AD8T y NGD8T) presentaron los coeficientes de variación elevados. Este comportamiento puede atribuirse a la baja frecuencia de ocurrencia de estos eventos dentro de las muestras evaluadas, lo que incrementa la variabilidad relativa de los datos sin que ello implique necesariamente errores experimentales.

Resultados similares fueron reportados por Carranza (2021) en semillas de trigo, quien observó elevados coeficientes de variación para plántulas anormales y semillas no germinadas al evaluar 24 variedades mediante pruebas de germinación estándar. Asimismo, Morales (2019), Cruz (2019), Bernabé (2019) y González (2021) documentaron este mismo comportamiento en avena, maíz, jitomate y cebada, respectivamente, lo que sugiere que la elevada variabilidad observada en este tipo de variables constituye una característica frecuente en estudios de germinación y calidad fisiológica de semillas.

La existencia de diferencias altamente significativas entre variedades justificó la realización de comparaciones de medias y análisis de correlación para determinar la asociación entre la emergencia temprana de radícula y la producción final de plántulas normales.

Comparación de medias

Con base en la comparación de medias de las variables de germinación evaluadas en las 14 variedades de trigo (Cuadro2), se observaron diferencias significativas entre variedades, lo que confirma los resultados obtenidos en el análisis de varianza. De acuerdo con las Reglas para la Certificación de Semillas establecidas por el SNICS (2021), el porcentaje mínimo de germinación requerido para semilla certificada de trigo es de 90 %.

En el primer conteo de germinación (GD2), las variedades 5, 6, 9 y 12 superaron dicho valor de referencia, destacando las variedades 6 y 12 con porcentajes de germinación de 96.0 % y 94.75 %, respectivamente. La capacidad de alcanzar altos porcentajes de germinación en etapas tempranas indica una mayor velocidad de emergencia de la radícula, característica

frecuentemente asociada con semillas de mayor vigor fisiológico y mejor desempeño durante el establecimiento inicial de las plántulas.

Las diferencias observadas entre variedades durante los primeros conteos sugieren que, aunque la mayoría de los materiales alcanzó porcentajes finales de germinación satisfactorios, existieron diferencias importantes en la velocidad del proceso germinativo. Esta característica resulta relevante debido a que una emergencia más rápida y uniforme suele favorecer el establecimiento del cultivo y una mejor expresión del potencial fisiológico de la semilla.

Para el segundo conteo (GD3), prácticamente todas las variedades superaron el estándar mínimo de germinación establecido para semilla certificada, con excepción de la variedad 4, que registró 89 % de germinación. A partir del quinto día de evaluación (GD5), todas las variedades alcanzaron porcentajes superiores al valor requerido por la normatividad vigente.

Cuadro 2. Comparación de medias de las variables de germinación en 14 variedades de trigo (Triticum aestivum L.).

VAR	GD2	GD3	GD5	GD6
1	89.50 ab	95.25 bcde	96.00 cde	96.50 bcd
2	87.00 ab	98.50 abc	99.50 ab	99.50 ab
3	65.25 cd	98.50 abc	98.75 abcd	99.00 abc
4	56.50 d	89.00 e	91.50 e	92.00 d
5	93.25 ab	96.75 abcd	97.25 bcde	97.50 abcd
6	96.00 a	98.50 abc	99.00 abc	99.00 abc
7	79.50 bc	96.00 bcde	97.00 bcde	97.00 bcd
8	87.75 ab	97.50 abcd	98.50 abcd	98.50 abc
9	92.75 ab	97.25 abcd	98.00 abcd	98.00 abc
10	87.50 ab	98.75 ab	99.75 a	99.75 a
11	86.00 ab	99.50 a	99.75 a	99.75 a
12	94.75 a	98.50 ab	98.50 abcd	98.50 abc
13	63.50 cd	92.75 de	94.75 de	95.75 cd
14	84.50 ab	94.00 cde	95.75 cde	96.00 cd

	GD7	ND8	AD8	NGD8
1	96.75 bcd	91.00 abcd	6.25 abc	2.75 abc

2	99.50	abc	86.00	bcd	13.50	a	0.50 bc
3	99.25	abc	92.75	abc	6.50	abc	0.75 bc
4	92.25	d	83.00	cd	9.25	abc	7.75 a
5	97.75	abcd	92.25	abcd	6.00	abc	1.75 bc
6	99.00	abc	95.25	ab	3.75	bc	1.00 bc
7	97.00	abcd	82.75	cd	14.75	a	2.50 abc
8	98.75	abc	95.50	a	3.25	c	1.25 bc
9	98.00	abcd	81.25	d	16.75	a	2.00 abc
10	99.75	a	91.75	abcd	8.00	abc	0.25 c
11	99.50	ab	93.25	abc	6.50	abc	0.25 c
12	98.50	abc	85.75	cd	12.75	ab	1.50 bc
13	95.75	cd	85.50	cd	10.75	ab	3.75 ab
14	96.25	cd	83.50	cd	12.75	ab	3.75 ab

VAR: Variedad; DMSH: Diferencia mínima significativa honesta; G2, G3, G5, G6, G7: Semillas germinadas en los conteos de los días 2, 3, 5, 6 y 7 respectivamente; GD2T, GD3T, GD5T, GD6T, GD7T: conteo transformado; ND4, AD4, NGD4: Plántulas normales, anormales y no germinadas en conteo del día 4; ND4T, AD4T y NGD4T: conteo transformado; Valores con letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas.

En términos generales, los bajos porcentajes de semillas no germinadas y plántulas anormales observados en la mayoría de las variedades indican un adecuado comportamiento germinativo bajo condiciones controladas de laboratorio. Asimismo, los resultados sugieren que los conteos tempranos de germinación pueden constituir una herramienta útil para identificar diferencias en la calidad fisiológica entre variedades

En la evaluación final realizada al día 8, se observaron diferencias significativas entre variedades en el porcentaje de plántulas normales (ND8), plántulas anormales (AD8) y semillas no germinadas (NGD8). Los porcentajes de plántulas normales oscilaron entre 81.25 % y 95.50 %, lo que evidencia una adecuada capacidad de germinación en la mayoría de los materiales evaluados.

Los resultados obtenidos indican que el porcentaje final de germinación, por sí solo, no refleja completamente la calidad fisiológica de una variedad. Variables como la proporción de plántulas normales, la presencia de plántulas anormales y el porcentaje de semillas no germinadas aportan información complementaria sobre el desempeño fisiológico de las semillas y permiten una evaluación más precisa de su calidad.

En conjunto, las diferencias observadas entre variedades durante los conteos tempranos y finales sugieren que la velocidad de germinación y la capacidad para producir plántulas normales son características asociadas con la calidad fisiológica de la semilla, lo que respalda el uso de la emergencia temprana de radícula como un posible indicador del desempeño germinativo posterior.

Prueba de correlación

Los resultados del análisis de correlación de Pearson (Cuadro 3) mostraron asociaciones positivas y altamente significativas ($p \leq 0.01$) entre los porcentajes de semillas germinadas registrados en los días 3, 5, 6 y 7 (GD3, GD5, GD6 y GD7) y el porcentaje final de plántulas normales al término de la prueba de germinación (ND8). Los coeficientes de correlación (r) oscilaron entre 0.434 y 0.489, lo que indica una asociación positiva entre la emergencia temprana de radícula y la capacidad posterior de producir plántulas normales.

La correlación más alta se observó entre GD7 y ND8 (r = 0.489), seguida por GD6 (r = 0.470) y ND4 (r = 0.464). Estos resultados sugieren que, conforme avanza el proceso germinativo, los conteos tempranos presentan una mayor asociación con el porcentaje final de plántulas normales, incrementando su utilidad como indicadores de calidad fisiológica.

Por el contrario, el porcentaje de germinación registrado al día 2 (GD2) presentó una correlación baja y no significativa con ND8 (r = 0.190), lo que indica que en etapas muy tempranas del proceso de germinación aún no se expresan plenamente las diferencias fisiológicas entre variedades. En consecuencia, los resultados sugieren que el segundo día de evaluación no constituye un momento adecuado para estimar el comportamiento germinativo final.

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre la germinación temprana y el porcentaje final de plántulas normales y anormales en trigo (*Triticum aestivum* L.).

	GD2	GD3	ND4	AD4	GD5	GD6	GD7
ND8	0.190	0.434 **	0.464 **	-0.251	0.454 **	0.470 **	0.489 **
AD8	0.001	-0.098	-0.177	0.186	-0.096	-0.106	-0.125

ND8, AD8: Plántulas normales, anormales en conteo 8; GD2, GD3, GD5, GD6, GD7: Semillas germinadas en los conteos 2, 3, 5, 6 y 7, respectivamente; ND4, AD4: Plántulas normales, anormales en conteo 4; **: Significativo con $P \leq 0.01$.

Los resultados obtenidos muestran que la relación entre la emergencia temprana de radícula y la producción de plántulas normales comienza a manifestarse de manera significativa a partir del tercer día de evaluación. Asimismo, las plántulas normales registradas al cuarto día (ND4) presentaron una correlación positiva con el porcentaje final de plántulas normales al octavo día (ND8), lo que sugiere que las evaluaciones tempranas pueden aportar información útil sobre la calidad fisiológica de las semillas antes de concluir la prueba estándar de germinación.

La correlación positiva observada coincide con lo reportado por Guan et al. (2018), quienes señalan que las semillas que germinan más rápidamente presentan una mayor probabilidad de desarrollar plántulas normales y expresar un mejor desempeño fisiológico. Sin embargo, aunque las correlaciones observadas fueron estadísticamente significativas, su magnitud fue moderada ($r = 0.434–0.489$), por lo que no fue posible desarrollar un modelo matemático con capacidad predictiva suficiente para estimar con precisión el porcentaje final de plántulas normales a partir de los conteos tempranos de germinación. La correlación entre porcentaje de germinación y plántulas anormales fue negativa y no significativa, lo que indica que la aparición de anormalidades durante el desarrollo de las plántulas no está directamente asociada con la velocidad de germinación.

Los resultados obtenidos contrastan con lo reportado por Morales (2019) en avena, quien encontró correlaciones elevadas entre los conteos tempranos de germinación y el porcentaje final de plántulas normales, permitiéndole desarrollar ecuaciones de regresión con capacidad predictiva. Esto sugiere que la utilidad de los conteos tempranos como herramienta predictiva puede variar entre especies y genotipos, por lo que se requieren estudios adicionales para confirmar su aplicabilidad en trigo.

De acuerdo con Ballesteros et al. (2016), la velocidad de establecimiento del cultivo constituye un indicador importante del estado fisiológico de las plantas y presenta asociación con el rendimiento. En este sentido, futuras investigaciones deberían incorporar variables complementarias, como características físicas de la semilla, pruebas de emergencia en campo y componentes del rendimiento, con el fin de fortalecer la interpretación de los resultados y mejorar la capacidad predictiva de los conteos tempranos de germinación.

Conclusiones

Las variedades de trigo evaluadas presentaron diferencias significativas en los parámetros de germinación, evidenciando variabilidad fisiológica entre genotipos en cuanto a velocidad de germinación y producción de plántulas normales.

Se identificó una correlación positiva y altamente significativa entre los conteos tempranos de germinación, particularmente a partir del tercer día de evaluación, y el porcentaje final de plántulas normales, indicando que las semillas con una emergencia más temprana de radícula tienden a presentar un mejor desempeño germinativo.
Los conteos tempranos de germinación mostraron potencial como indicadores preliminares de la calidad fisiológica de las semillas de trigo, ya que permitieron detectar tendencias asociadas con el comportamiento final de las semillas durante la prueba estándar de germinación.

Aunque se identificó una asociación significativa entre la emergencia temprana de radícula y el porcentaje final de plántulas normales, la magnitud moderada de las correlaciones obtenidas no permitió desarrollar una ecuación predictiva con suficiente precisión para estimar el comportamiento final de las semillas y reducir formalmente el tiempo de la prueba de germinación

Por lo tanto, la hipótesis planteada se acepta parcialmente, ya que existió una correlación significativa entre los conteos tempranos de germinación y el porcentaje final de plántulas normales; sin embargo, dicha asociación no fue suficientemente fuerte para generar un modelo predictivo aplicable a procesos de certificación de semillas.

Literatura citada

Ballesteros, E., Vaca, V. M., Morales, E. J., Franco, O., Zamudio, B., & Gutiérrez Rodríguez, F. (2016). Fraccionamiento de nitrógeno: Eficiencia de recuperación y concentración proteica en triticale (×Triticosecale Wittmack). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7, 585–598.

Bernabé, M. S. (2019). *Emergencia de radícula para certificación de porcentaje de germinación en dos especies olerícolas* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio Institucional UACh.

Carranza, S. (2021). *Calidad de semillas de variedades mejoradas de trigo liberadas en México*. [Tesis de maestría en ciencias, Colegio de Postgraduados].

Cruz, M. (2019). *Relación entre la emisión de radícula y el porcentaje de plántulas normales en maíz (Zea mayz L.) en una prueba de germinación estándar para fines de certificación.* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo].

García, J., Ruíz, N., Lira, R., Vera, L., & Méndez, B. (2016). *Técnicas para evaluar germinación, vigor y calidad fisiológica de semillas sometidas a dosis de nanopartículas*. Centro de Investigación en Química Aplicada.

González, M. (2021). *Relación entre la emisión de radícula y el porcentaje de plántulas normales en cebada (Hordeum Vulgare L.) en una prueba de germinación estándar para fines de certificación.* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo].

Guan, Y. J., Yin, M. Q., Jia, X. W., An, J. Y., Wang, C., Pan, R. H., Song, W. J., & Hu, J. (2018). Single counts of radicle emergence can be used as a vigour test to predict seedling emergence potential of wheat. *Seed Science and Technology*, 46(2), 349–357.

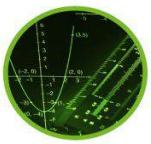
IInternational Seed Testing Association (ISTA). (2024). *International Rules for Seed Testing*. Zurich, Suiza.

Morales, T. (2019). *Relación entre la emisión de radícula y el porcentaje de plántulas normales en avena (Avena sativa L.) en una prueba de germinación estándar para fines de certificación*. [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo].

Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS). (2021). *Regla para la certificación de semillas: trigo (Triticum ssp.).* Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural.

TEMÁTICA 6. BIOTECNOLOGÍA, NANOTECNOLOGÍA Y MICROBIOLOGÍA APLICADA

Áreas Temáticas



Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible



Economía Agrícola, Desarrollo Territorial, Tecnología e Innovación Social



Ciencias Biológicas y Agronómicas



Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global



Desarrollo rural, agroecología y cambio climático

Caracterización fenotípica de hongos filamentosos de la colección *R* de la micoteca del Centro Universitario UTEG provenientes de suelo agavero fragmentado

Castillo Esparza Dana Aocela[68], Ramírez Martínez Izchel, María de los Ángeles Olea Rodríguez[69], Alemán Duarte Mario Iván*, Edgar Balcázar López*

Resumen

Las micotecas constituyen recursos importantes para la investigación, la docencia y el desarrollo biotecnológico. Sin embargo, cuando no se mantienen bajo condiciones adecuadas, pueden presentar pérdida de viabilidad, estabilidad, calidad y pureza. Estas deficiencias suelen relacionarse con contaminación cruzada, conservación inadecuada de los cultivos, lo que puede comprometer la colección. El objetivo de este estudio fue contribuir al fortalecimiento de la micoteca del Laboratorio de Microbiología del Centro Universitario UTEG mediante la recuperación, purificación, caracterización fenotípica y conservación de accesiones resguardadas en la colección *R*. Para ello, se emplearon técnicas microbiológicas convencionales que incluyeron el rescate de las accesiones a partir del material conservado, su purificación mediante resiembras sucesivas, la verificación de su pureza y la caracterización de sus rasgos macroscópicos y microscópicos. Posteriormente, los aislamientos recuperados se conservaron en forma de esporas para favorecer su estabilidad, viabilidad y disponibilidad para estudios posteriores. Las cepas procedían de suelos agrícolas de Tepatitlán, Jalisco, asociados al cultivo de agave y expuestos durante aproximadamente dos décadas al uso continuo de fertilizantes y pesticidas, condiciones capaces de modificar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y ejercer presiones de selección sobre las comunidades microbianas. Los resultados permitieron recuperar, purificar y caracterizar siete aislamientos fúngicos a partir de material contaminado. La estrategia implementada fortaleció el control de calidad, el valor académico de la micoteca y la continuidad de futuras investigaciones con las accesiones resguardadas.

68 Centro Universitario UTEG, Campus Guadalajara, Héroes Ferrocarrileros No. 1325, Col. La Aurora, C.P. 44460, Guadalajara, Jalisco, México. Correo electrónico: mario.aleman@uteg.edu.mx, castilloesparzad2etm@gmail.com, izchel2109@gmail.com

69 Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de Guadalajara, Blvd. Marcelino García Barragán No. 1421, Col. Olímpica, C.P. 44430, Guadalajara, Jalisco, México. Correo electrónico: mario.aleman@academicos.udg.mx, edgar.balcazar@academicos.udg.mx

Palabras clave: micoteca; hongos filamentosos; caracterización fenotípica; conservación de cepas

Abstract

Fungal culture collections are valuable resources for scientific research, education, and biotechnological development. However, inadequate maintenance may lead to the loss of viability, stability, quality, and purity of preserved strains. These deficiencies are commonly associated with cross-contamination and improper preservation practices, ultimately compromising the integrity of the collection. The aim of this study was to strengthen the fungal culture collection of the Microbiology Laboratory at Centro Universitario UTEG through the recovery, purification, phenotypic characterization, and preservation of fungal accessions maintained in Collection R. Conventional microbiological techniques were employed to recover strains from preserved material, purify them through successive subcultures, verify their purity, and characterize their macroscopic and microscopic features. Subsequently, the recovered isolates were preserved as spores to ensure their stability, viability, and long-term availability for future research. The analyzed strains originated from agricultural soils in Tepatitlán, Jalisco, Mexico, associated with agave cultivation and exposed to continuous applications of fertilizers and pesticides for approximately two decades. Such conditions may alter the physical, chemical, and biological properties of the soil while exerting selective pressures on resident microbial communities. The implemented methodology enabled the recovery, purification, and phenotypic characterization of seven fungal isolates from contaminated material. Overall, the strategy strengthened the collection's internal quality control, enhanced its academic value, and supported the long-term preservation and future use of the fungal accessions for research and teaching purposes.

Key words: fungal culture collection; filamentous fungi; phenotypic characterization; strain preservation.

Introducción

Las micotecas constituyen infraestructuras esenciales para la conservación, documentación y disponibilidad de recursos fúngicos utilizados en investigación, docencia y desarrollo biotecnológico. Su valor depende no solo del número de accesiones resguardadas, sino también de la aplicación de procedimientos que aseguren su viabilidad, pureza, estabilidad y trazabilidad. Cuando estos criterios no se mantienen, pueden presentarse contaminación cruzada, pérdida de características fenotípicas y disminución de la confiabilidad del material biológico conservado (Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD], 2007).

La caracterización fenotípica representa una etapa inicial para el reconocimiento y control de calidad de los hongos filamentosos. Este proceso integra la evaluación de características macroscópicas, como la forma, textura, pigmentación, zonación y crecimiento de las colonias, con la observación microscópica de hifas, conidióforos, células conidiógenas, conidios y estructuras de resistencia. La combinación de estos caracteres permite diferenciar morfotipos y realizar una asignación taxonómica preliminar; sin embargo, la expresión del fenotipo puede modificarse por el medio de cultivo, la temperatura, la edad de la colonia y las condiciones de incubación, por lo que la identificación morfológica no siempre permite resolver con precisión el nivel de especie (Campbell et al., 2013).

En la micoteca del Laboratorio de Microbiología del Centro Universitario UTEG se conserva la colección *R*, integrada por accesiones obtenidas originalmente de suelos agrícolas asociados con el cultivo de agave en Tepatitlán, Jalisco. La presencia de contaminación y crecimiento heterogéneo limitaba su conservación, documentación y aprovechamiento académico. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue recuperar, purificar y caracterizar fenotípicamente las accesiones de la colección *R*, mediante la evaluación de sus características macroscópicas, microscópicas y de crecimiento radial, con la finalidad de establecer una asignación taxonómica preliminar a nivel de género y fortalecer su registro dentro de la micoteca institucional.

Materiales y métodos

La investigación se realizó durante 2025 en el Laboratorio de Microbiología del Centro Universitario UTEG, ubicado en Guadalajara, Jalisco, México. Se trabajó con 14 accesiones fúngicas pertenecientes a la colección *R*, resguardada en la micoteca institucional. El estudio se desarrolló bajo un diseño descriptivo, longitudinal y no comparativo, orientado a la recuperación, purificación, conservación y caracterización fenotípica de las accesiones. Cada aislamiento recuperado se consideró una unidad de observación, mientras que los pases sucesivos y las mediciones realizadas sobre una misma colonia se consideraron verificaciones técnicas.

Reactivación y purificación de las accesiones

Para la reactivación y purificación se utilizó agar dextrosa papa, PDA (BD Bioxon), de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Debido a que algunas accesiones presentaban contaminación y crecimiento heterogéneo, se evaluaron dos procedimientos de recuperación: la siembra por punción y el subcultivo del borde de la colonia. En la siembra por punción, una porción del material fúngico se transfirió con una aguja o asa recta estéril y se inoculó en el centro del medio. Para el subcultivo del borde se seleccionó una porción de micelio

joven y metabólicamente activo localizada en la periferia de la colonia, preferentemente en una zona sin evidencia visible de contaminación. El fragmento se retiró con un bisturí estéril y se transfirió a una nueva caja con PDA. Los cultivos se incubaron a 30 °C y se revisaron a partir de las primeras 24 h. Los subcultivos se repitieron hasta obtener colonias con crecimiento uniforme y sin evidencia macroscópica o microscópica de contaminación. Una vez que cada acceso se consideró puro, se realizaron tres pases consecutivos en PDA para comprobar la uniformidad y estabilidad de su fenotipo. La pureza se verificó mediante la homogeneidad de la textura, coloración, margen y patrón de crecimiento colonial, así como por la observación microscópica de las estructuras fúngicas.

Conservación y evaluación de la estabilidad fenotípica

Las 14 accesiones de la colección *R* se conservaron mediante refrigeración a una temperatura de entre 4 y 8 °C. Entre los cuatro y seis meses de almacenamiento se efectuaron evaluaciones mensuales de viabilidad, pureza y estabilidad morfológica. Para ello, las accesiones se resembraron en PDA y se incubaron a 30 °C. La viabilidad se determinó mediante la recuperación del crecimiento micelial después de la resiembra. La pureza se evaluó considerando la uniformidad de las colonias y la ausencia de sectores atípicos o crecimiento correspondiente a otros microorganismos. La estabilidad morfológica se examinó mediante la comparación de la forma de crecimiento, textura, margen, producción de micelio aéreo, pigmentación del anverso y reverso, presencia de zonación, producción de pigmentos difusibles y conservación de las estructuras reproductivas.

Caracterización macroscópica

La caracterización macroscópica se realizó mediante la observación directa de las colonias desarrolladas en PDA. Para cada aislamiento se registraron la forma de la colonia, el tipo de margen, la elevación, la textura, la coloración de la superficie y del reverso, la presencia de zonación, la formación de exudados y la producción de pigmentos difusibles. La textura se describió como algodonosa, aterciopelada, pulverulenta, granulosa, cremosa, vellosa o seca, según la apariencia del micelio y el grado de esporulación. Las características se documentaron mediante fotografías del anverso y reverso de las colonias durante su desarrollo, debido a que la pigmentación, textura y producción de estructuras reproductivas pueden modificarse con la edad del cultivo.

Caracterización microscópica

La caracterización microscópica se efectuó mediante la técnica de cinta adhesiva o *tape mount*, utilizando azul de lactofenol como medio de montaje y contraste, de acuerdo con el

procedimiento descrito por Campbell et al. (2013). Se colocó una gota del colorante sobre un portaobjetos limpio y, con un fragmento de cinta adhesiva transparente, se tomó una muestra superficial del micelio aéreo. La presión ejercida sobre la colonia se mantuvo al mínimo para evitar la ruptura o acumulación excesiva de las estructuras fúngicas. La cinta se colocó sobre la gota de azul de lactofenol, procurando que la superficie adhesiva que contenía la muestra quedara en contacto con el colorante. Las preparaciones se examinaron mediante microscopía óptica con los objetivos de 40× y 100×; para este último se utilizó aceite de inmersión. Durante la observación se registraron la presencia de septos, el grosor y el patrón de ramificación de las hifas; la morfología y disposición de los conidióforos y las células conidiógenas; así como la forma, coloración y organización de conidios, microconidios, macroconidios, clamidosporas y otras estructuras con valor taxonómico. La asignación preliminar a nivel de género se efectuó mediante la integración de las características macroscópicas y microscópicas observadas.

Evaluación del crecimiento radial

La velocidad de crecimiento radial se evaluó en los aislamientos que conservaron pureza, viabilidad y uniformidad fenotípica después de los tres pases consecutivos. De la periferia de una colonia joven se obtuvo un disco de micelio de 5 mm de diámetro mediante un sacabocados estéril, seleccionando una zona con baja esporulación. El disco se colocó en el centro de una caja Petri de aproximadamente 90 mm de diámetro que contenía PDA. Las cajas se incubaron a 30 °C y el diámetro colonial se registró cada 12 h, a las 12, 24, 36, 48 y 60 h de incubación. Las mediciones se realizaron con un vernier digital (ABS Digimatic, modelo 500-196-30), con intervalo de medición de 0–150 mm y resolución de 0.01 mm. Para cada colonia se obtuvieron cuatro lecturas del diámetro en orientaciones equidistantes, utilizando el centro del inóculo como punto de referencia. Las cuatro lecturas se promediaron para obtener el diámetro colonial de cada acceso en cada tiempo de evaluación. Estas lecturas correspondieron a mediciones técnicas de una misma unidad de observación. Se realizaron 3 repeticiones biológicas independientes. El seguimiento concluyó cuando la colonia alcanzó el límite disponible del medio o al completarse las 60 h de incubación.

Cálculo de la velocidad de crecimiento radial

La velocidad de crecimiento radial (VCR) se estimó de manera independiente para cada aislamiento mediante una regresión lineal simple entre el diámetro colonial y el tiempo de incubación. Para el ajuste se empleó el siguiente modelo:

$$D_t = \beta_0 + \beta_1 t + \varepsilon \quad (1)$$

donde D_t representa el diámetro colonial (cm) en el tiempo t (h); β_0 corresponde al intercepto del modelo; β_1 es la pendiente de la recta, interpretada como la VCR y expresada en cm h^{-1}; y ε representa el error residual.

Para cada aislamiento se obtuvo la ecuación de regresión y el coeficiente de determinación (R^2). Los modelos se ajustaron mediante la función lm() del paquete **stats** en R versión 4.4.2 (R Core Team, 2024), ejecutado en RStudio. Las representaciones gráficas del diámetro colonial en función del tiempo y las líneas de regresión se elaboraron con el paquete ggplot2 (Wickham, 2016).

Resultados y discusión

Se partió de un conjunto de accesiones fúngicas de la colección *R*, resguardadas en el Laboratorio de Microbiología del Centro Universitario UTEG, que presentaban contaminación y crecimiento heterogéneo. Para su recuperación se evaluaron la siembra por punción y el subcultivo del borde de la colonia. Este último procedimiento permitió obtener cultivos con mayor uniformidad morfológica y sin evidencia visible de contaminación, por lo que se empleó en los pases sucesivos de purificación. En total se recuperaron siete aislamientos, designados como *R*3.10, *R*7.5, *R*3.7, *R*3, *R*9.1, *R*11 y *R*7.6. La recuperación de estos aislamientos mostró que parte del material conservado mantenía viabilidad y podía ser incorporado nuevamente al registro de la micoteca institucional.

Caracterización macroscópica

La caracterización macroscópica evidenció diversidad fenotípica entre los aislamientos (**Figura 1**). Los morfotipos *R*3.10, *R*7.5, *R*7.6, *R*11, *R*9.1 y *R*3.7 desarrollaron colonias circulares, de margen liso, elevación plana y textura aterciopelada. En contraste, *R*3 presentó una colonia irregular, con margen ondulado, elevación convexa y textura algodonosa, acompañada de abundante micelio aéreo. También se registraron diferencias en la coloración del reverso, la zonación y la producción de pigmentos. Los aislamientos *R*7.6 y *R*11

mostraron pigmentación verde-amarilla, mientras que *R*3 presentó pigmentación negra, reverso rojizo y anillos concéntricos. Estas características permitieron distinguir morfotipos dentro de la colección *R* sin asumir una identificación definitiva a nivel de especie.

Los aislamientos R3.10, R7.5, R7.6, R11, R9.1 y R3.7 compartieron colonias circulares, planas, de margen liso y textura aterciopelada, aunque presentaron diferencias en la coloración del reverso, la zonación y la producción de pigmentos. Estas características coinciden con la variabilidad documentada para el género *Trichoderma*, donde aislamientos estrechamente relacionados pueden diferir en pigmentación, esporulación y apariencia colonial aun cuando conservan características generales semejantes. Por ello, los cambios verde-amarillos registrados en R7.6 y R11, así como las tonalidades amarillas o naranjas observadas en otros aislamientos, respaldan su agrupación fenotípica preliminar, pero no permiten establecer por sí mismos una identidad taxonómica definitiva (Gu et al., 2020).

En contraste, R3 presentó una colonia irregular, convexa y algodonosa, con abundante micelio aéreo, anillos concéntricos, reverso rojizo y pigmentación oscura, lo que permitió diferenciarlo claramente del resto de la colección *R*. Este patrón concuerda parcialmente con la diversidad macroscópica descrita para el género *Fusarium*, cuyos aislamientos pueden desarrollar micelio algodonoso y pigmentaciones que varían de blancas y rosadas a rojizas o carmín, dependiendo del aislamiento y de las condiciones de cultivo (Yli-Mattila et al., 2018). No obstante, debido a que el medio, la temperatura y la edad del cultivo pueden modificar la morfología y pigmentación colonial, estos caracteres deben interpretarse junto con las estructuras microscópicas y, posteriormente, con evidencia **0**molecular (van Diepeningen et al., 2015).

Morfotipo	Forma de colonia	Margen de colonia	Elevación	Textura	Color superficial	Color reverso	Zonación	Producción de pigmento
R3. 10 	Circular	Liso	Plana	Aterciopelada	Blanco	Blanco	N/A	N/A
R7.5 	Circular	Liso	Plana	Aterciopelada	Blanco	Naranja	N/A	N/A
R7.6 	Circular	Liso	Plana	Aterciopelada	Blanco	Amarilla	Cambios de color	Verde – Amarilla
R11 	Circular	Liso	Plana	Aterciopelada	Blanco	Blanco	Cambios de color	Verde – Amarilla
R9.1 	Circular	Liso	Plana	Aterciopelada	Blanco	Amarilla	Cambios de color	N/A
R3 	Irregular	Ondulado	Convexa	Algodonosa (mas aéreas produce mucho micelio aéreo)	Café	Rojiza	Presencia de anillos concéntricos	Negro
R3.7 	Circular	Liso	Plana	Aterciopelada	Blanca - brillante	Blanco	Cambios de color	N/A

Figura 9.Caracterización macroscópica de los aislamientos fúngicos de la colección R.

Fuente: Construcción propia. Se presentan fotografías representativas de las colonias correspondientes a los aislamientos R3.10, R7.5, R7.6, R11, R9.1, R3 y R3.7, acompañadas de la descripción de su forma, margen, elevación, textura, coloración superficial y del reverso, zonación y producción de pigmentos. N/A: característica no observada o no aplicable.

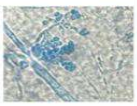
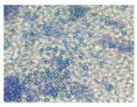
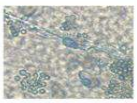
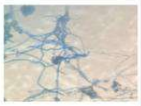
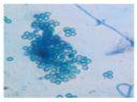
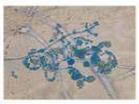
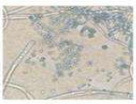
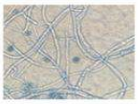
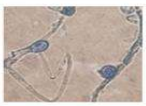
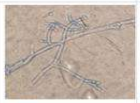
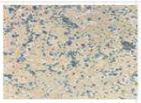
CEPA	DESCRIPCION	HIFAS	CONDIOFOROS	ESPORAS	ESTRUCTURAS ESPECIALES
R3.10	Macrosifonado, hifas hialinas septadas. Conidioforo ramificado. Proliferacion simpodial. Microconidios simples en racimos. Presencia de Artroconidios.				
R7.5	Macrosifonado, hifas hialinas septadas. Conidioforos y conidios redondeados en sucesion basipeta. Presencia de clamidosporas y macroconidios simples en racimos.				
R3.7	Microsifonado, hifas hialinas. Conidioforos dentritico. Presencia de conidios talicos, red fractal y macroconidios simples. Se observa agrupaciones de masas globosas de conidios dispersos. Proliferacion monopodica.				
R9.1	Macrosifonado, hifas hialinas finas y conidios en forma de margarita. Presencia de conidioforos ramificados con macroconidios en cadenas lineales. Formacion de fialoconidios y blastoconidios agrupados en masas.				
R11	Macrosifonado, septado, Hifas hialino con ensanchamiento en los extremos en forma de raquetas Conidioforos y conidios como cumulos de estructuras redondeadas				
R7.6	Macrosifonado, septado e hifas hialinas con filamentos delgados y ramificados Conidioforos y conidios circulares en forma de racimo de uvas				
R3	Macrosifonado, septada y hialina, ensanchamiento regular en forma de raqueta Conidioforos ramificados en la parte superior				

Figura 10. *Caracterización microscópica de los aislamientos fúngicos de la colección R.*

Se presentan microfotografías representativas de las hifas, conidióforos, conidios y estructuras especiales observadas en los aislamientos R3.10, R7.5, R3.7, R9.1, R11, R7.6 y R3. Las preparaciones se realizaron mediante la técnica de cinta adhesiva con azul de lactofenol y se examinaron por microscopía óptica. Las características registradas se utilizaron, en conjunto con la morfología colonial, para efectuar la asignación taxonómica preliminar de los aislamientos a nivel de género.

La caracterización microscópica documentó variaciones en la morfología de las hifas, los conidióforos, los conidios y otras estructuras especializadas (Figura 2). Con base en la integración de estos caracteres, seis aislamientos (*R*3.10, *R*7.5, *R*3.7, *R*9.1, *R*11 y *R*7.6)

presentaron características consideradas compatibles, de manera preliminar, con el género *Trichoderma*. Entre los rasgos registrados se encontraron hifas hialinas septadas, conidióforos ramificados, conidios y estructuras de resistencia en algunos aislamientos. La presencia recurrente de este género en la colección es congruente con su amplia distribución en suelos y sustratos orgánicos, así como con su capacidad para colonizar diversos nichos y crecer rápidamente en medios de cultivo (Samuels, 2006; Druzhinina et al., 2011).

La accesión *R*3 mostró un patrón distinto, caracterizado por microconidios agrupados en falsas cabezas, presencia de monofialides y polifialides, y formación de macroconidios. Estos rasgos fueron compatibles con el género *Fusarium*. Debido a la variabilidad morfológica y a la existencia de complejos de especies dentro de este género, la identificación se mantuvo en un nivel taxonómico preliminar (Campbell et al., 2013; O'Donnell et al., 2022).

La observación microscópica permitió reconocer diferencias en la organización de las hifas, los patrones de ramificación de los conidióforos y la disposición de los conidios. Los aislamientos R3.10, R7.5, R3.7, R9.1, R11 y R7.6 presentaron, en términos generales, hifas hialinas septadas, conidióforos ramificados y conidios agrupados en racimos, cadenas o masas, además de clamidosporas en algunos casos. Este conjunto de caracteres es compatible con la morfología descrita para especies de Trichoderma, cuyos conidióforos suelen presentar ramificaciones sucesivas asociadas con fialides y conidios hialinos, globosos, subglobosos o elipsoidales. No obstante, la variación observada en la disposición de los conidios y en las estructuras especiales también evidencia heterogeneidad fenotípica entre los aislamientos asignados preliminarmente al mismo género.

El aislamiento R3 presentó una micromorfología diferenciada, caracterizada en el registro original por hifas hialinas septadas, conidióforos ramificados, microconidios agrupados en falsas cabezas, monofialides, polifialides y macroconidios. Estos caracteres han sido utilizados en otras investigaciones para la identificación preliminar de Fusarium, género en el que la forma y disposición de microconidios y macroconidios, el tipo de célula conidiógena y la presencia de clamidosporas constituyen criterios taxonómicos relevantes. Estudios realizados con aislamientos del género *Fusarium* han mostrado, sin embargo, que estos rasgos pueden variar entre especies y complejos de especies, por lo que la caracterización morfológica debe considerarse una aproximación inicial y complementarse con análisis moleculares para confirmar la identidad taxonómica.

Cálculo de la Velocidad de Crecimiento Radial en condiciones estándar

La velocidad de crecimiento radial (VCR) mostró variación descriptiva entre los siete aislamientos de la colección *R* (Tabla 1). El aislamiento *R*3 presentó la media más alta, con

0.074 ± 0.001 mm h^{-1} y 1.77 ± 0.02 mm $día^{-1}$, seguido de *R*9.1, con 0.073 ± 0.001 mm h^{-1} y 1.75 ± 0.01 mm $día^{-1}$. En contraste, *R*11 registró la media más baja, con 0.059 ± 0.002 mm h^{-1} y 1.41 ± 0.06 mm $día^{-1}$, mientras que los valores de los demás aislamientos se situaron entre ambos extremos. Estos resultados muestran que los morfotipos de la colección *R* no presentaron un comportamiento uniforme de expansión radial, incluso entre aquellos asignados preliminarmente al mismo género (Figura 3).

Las pendientes obtenidas mediante regresión lineal fueron congruentes con las VCR promedio. Además, los valores de R^2, comprendidos entre 0.915 y 0.982, indican que el crecimiento radial presentó un comportamiento predominantemente lineal durante el periodo evaluado. Esta respuesta coincide con investigaciones en las que distintos aislamientos de *Trichoderma* mostraron variaciones en su crecimiento micelial aun cuando fueron cultivados bajo condiciones comparables, lo que evidencia que la velocidad de expansión puede depender de las características fisiológicas de cada aislamiento y de su respuesta a factores como la temperatura y el medio de cultivo.

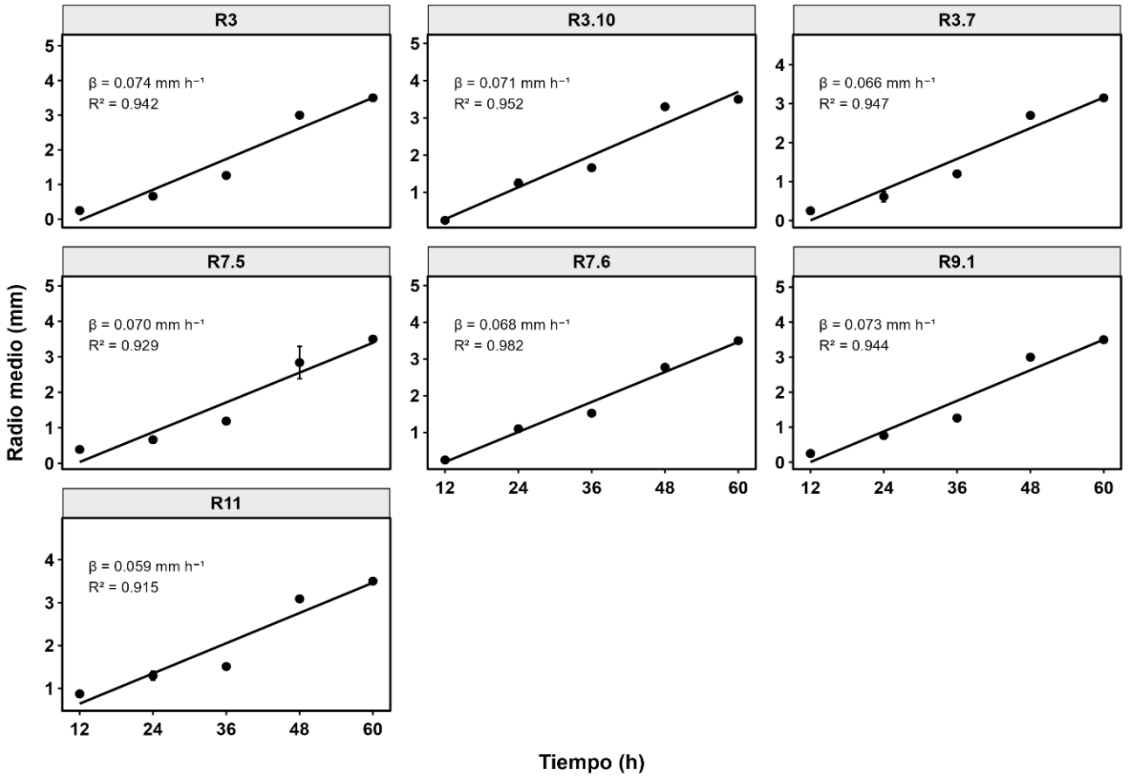


Figura 3. Crecimiento radial de las cepas de la serie R en función del tiempo de incubación.

Cada panel muestra el crecimiento radial promedio de una cepa y su ajuste mediante regresión lineal. La pendiente de la recta, indicada como β, representa la velocidad de crecimiento radial expresada en mm h^{-1}. El coeficiente de determinación, R^2, indica el grado de ajuste del modelo lineal a los datos observados

El mayor valor registrado en *R*3 también muestra que el aislamiento asignado preliminarmente al género *Fusarium* presentó una expansión radial comparable o superior a la observada en los morfotipos relacionados con el género *Trichoderma*. En especies del género *Fusarium* se ha documentado que el crecimiento radial puede variar entre aislamientos y modificarse en respuesta a las condiciones ambientales y nutricionales, por lo que este parámetro constituye un rasgo fisiológico complementario, pero no un criterio taxonómico independiente.

La interpretación de *R*3 debe realizarse con cautela, debido a que su crecimiento se registró cada 24 h, mientras que los demás aislamientos se evaluaron cada 12 h. Asimismo, dado que no se aplicaron pruebas inferenciales para comparar las VCR, los valores observados únicamente permiten establecer tendencias descriptivas.

Importancia de la recuperación de la colección

La recuperación de estos siete aislamientos permitió disponer de material biológico viable para futuras actividades de docencia e investigación. Actualmente se cuenta con conidios viables almacenados en refrigeración. La documentación de sus características fenotípicas constituyó el primer paso para mejorar la organización de la micoteca y reducir la incertidumbre asociada con la identidad de las accesiones.

La presencia predominante de aislamientos relacionados con *Trichoderma* resulta de interés por las aplicaciones biotecnológicas atribuidas a este género, entre ellas el control biológico de hongos fitopatógenos, la producción de enzimas hidrolíticas y la transformación de diferentes materiales orgánicos. De manera similar, el aislamiento asignado a *Fusarium* puede ser relevante para estudios ecológicos, agrícolas o toxicológicos, aunque su utilización debe considerar que algunas especies de este género pueden comportarse como fitopatógenos o producir metabolitos de importancia sanitaria.

Los resultados obtenidos no permiten determinar dichas capacidades funcionales, pero proporcionan una base para seleccionar los aislamientos que podrían evaluarse posteriormente mediante pruebas de actividad enzimática, antagonismo, degradación de compuestos o tolerancia a diferentes condiciones ambientales.

Conclusiones

La combinación de características macroscópicas, microscópicas y fisiológicas constituye una estrategia adecuada para la caracterización preliminar de hongos filamentosos. Sin embargo, la identificación fenotípica no permite determinar con certeza la especie de los aislamientos. Por esta razón, se recomienda complementar la investigación mediante la secuenciación de marcadores moleculares apropiados, como la región ITS y, según el género, genes con mayor capacidad de discriminación taxonómica. Los resultados obtenidos proporcionan una base documentada para el manejo de la colección *R* en la micoteca del Centro Universitario UTEG y para la selección de aislamientos en investigaciones posteriores. Las posibles aplicaciones en control biológico, biorremediación o degradación de compuestos no fueron evaluadas en este estudio; por tanto, deberán comprobarse mediante

ensayos funcionales específicos antes de atribuir capacidades biotecnológicas a los aislamientos recuperados.

Literatura citada

Campbell, C. K., Johnson, E. M., & Warnock, D. W. (2013). *Identification of pathogenic fungi* (2nd ed.). Wiley-Blackwell. https://doi.org/10.1002/9781118520055

Druzhinina, I. S., Seidl-Seiboth, V., Herrera-Estrella, A., Horwitz, B. A., Kenerley, C. M., Monte, E., Mukherjee, P. K., Zeilinger, S., Grigoriev, I. V., & Kubicek, C. P. (2011). *Trichoderma*: The genomics of opportunistic success. *Nature Reviews Microbiology*, *9*(10), 749–759. https://doi.org/10.1038/nrmicro2637

Gu, X., Wang, R., Sun, Q., Wu, B., & Sun, J.-Z. (2020). Four new species of *Trichoderma* in the Harzianum clade from northern China. *MycoKeys*, *73*, 109–132. https://doi.org/10.3897/mycokeys.73.51424

Organisation for Economic Co-operation and Development. (2007). *OECD best practice guidelines for biological resource centres*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264128767-en (OECD)

O'Donnell, K., Whitaker, B. K., Laraba, I., Proctor, R. H., Brown, D. W., Broders, K., Kim, H.-S., McCormick, S. P., Busman, M., Aoki, T., Torres-Cruz, T. J., & Geiser, D. M. (2022). DNA sequence-based identification of *Fusarium*: A work in progress. *Plant Disease*, *106*(6), 1597–1609. https://doi.org/10.1094/PDIS-09-21-2035-SR

R Core Team. (2024). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.4.2) [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Samuels, G. J. (2006). *Trichoderma*: Systematics, the sexual state, and ecology. *Phytopathology*, *96*(2), 195–206. https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0195

Van Diepeningen, A. D., Brankovics, B., Iltes, J., van der Lee, T. A. J., & Waalwijk, C. (2015). Diagnosis of *Fusarium* infections: Approaches to identification by the clinical mycology laboratory. *Current Fungal Infection Reports*, *9*(3), 135–143. https://doi.org/10.1007/s12281-015-0225-2

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4

Yli-Mattila, T., Hussien, T. A., Gavrilova, O., & Gagkaeva, T. (2018). Morphological and molecular variation between *Fusarium avenaceum*, *Fusarium arthrosporioides*, and *Fusarium anguioides* strains. *Pathogens*, *7*(4), Article 94. https://doi.org/10.3390/pathogens7040094

Cinética de fermentación de *Kluyveromyces marxianus* en lactosuero para la producción de bioaromas mediante precursores

Miguel Ángel Hernández Cruz[70], Carlos Alberto Gómez Aldapa[71], Ariadna Bárbara Lara Gómez[2], Arturo Cadena Ramírez[72]

Resumen

El aprovechamiento del lactosuero para producir bioaromas requiere optimizar el uso de precursores metabólicos. El objetivo de esta investigación fue evaluar la respuesta de *Kluyveromyces marxianus* a la adición de alcohol isoamílico (0.25, 0.5, 0.75 y 1 % v/v) y L-leucina (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 g/L) durante la fermentación de lactosuero crudo. Se monitorearon el crecimiento celular, consumo de lactosa, pH y producción de etanol, alcohol isoamílico y acetato de isoamilo. El alcohol isoamílico inhibió por completo el crecimiento celular a concentraciones ≥0.75 %; en contraste, con 0.25 % la levadura mantuvo actividad fermentativa y produjo hasta 85.14 mg/L de acetato de isoamilo. La L-leucina no comprometió la viabilidad celular; con 1.5 y 2.0 g/L, la reducción de lactosa superó 99 %, mientras que las producciones máximas de etanol y alcohol isoamílico alcanzaron 23.74 g/L y 733.90 mg/L, respectivamente. Sin embargo, la formación de acetato de isoamilo permaneció por debajo de 8 mg/L. Se concluye que *K. marxianus* responde de manera diferencial a ambos precursores: concentraciones bajas de alcohol isoamílico favorecen directamente la esterificación, mientras que la L-leucina fortalece el metabolismo fermentativo y promueve la formación endógena de alcohol isoamílico mediante la vía de Ehrlich. Estos resultados sustentan la evaluación posterior de estrategias combinadas para optimizar la producción de bioaromas a partir de lactosuero.

Palabras clave: Lactosuero, *Kluyveromyces marxianus*, bioaromas, L-leucina, acetato de isoamilo.

Abstract

70 Tecnológico Nacional de México/ITS del Occidente del Estado de Hidalgo, División de Gestión Empresarial, Paseo del Agrarismo 2000, Ctra. Mixquiahuala-Tula, km 2.5, Mixquiahuala de Juárez, Hidalgo, México, 42700. *mahernandezc@itsoeh.edu.mx

71 Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Química, Ctra. Pachuca-Tulancingo km 4.5, Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, 42184. he190819@uaeh.edu.mx; cgomeza@uaeh.edu.mx; la347145@uaeh.edu.mx

72 Universidad Politécnica de Pachuca, Departamento de Ingeniería Biomédica, Ctra. Pachuca-Cd. Sahagún km 20, Ex-Hacienda de Santa Bárbara, Zempoala, Hidalgo, México, 43830. arturocadena@upp.edu.mx

The valorization of whey for bioaroma production requires optimization of metabolic precursor use. This study evaluated the response of *Kluyveromyces marxianus* to the addition of isoamyl alcohol (0.25, 0.5, 0.75, and 1% v/v) and L-leucine (0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 g/L) during whey fermentation. Cell growth, lactose consumption, pH, and the production of ethanol, isoamyl alcohol, and isoamyl acetate were monitored. Isoamyl alcohol completely inhibited cell growth at concentrations ≥0.75%; in contrast, at 0.25% the yeast maintained fermentative activity and produced up to 85.14 mg/L of isoamyl acetate. L-leucine did not compromise cell viability; at 1.5 and 2.0 g/L, lactose reduction exceeded 99%, while maximum ethanol and isoamyl alcohol production reached 23.74 g/L and 733.90 mg/L, respectively. However, isoamyl acetate production remained below 8 mg/L. It is concluded that *K. marxianus* responds differently to both precursors: low concentrations of isoamyl alcohol directly favor esterification, whereas L-leucine strengthens fermentative metabolism and promotes endogenous isoamyl alcohol formation through the Ehrlich pathway. These results support the subsequent evaluation of combined strategies to optimize bioaroma production from whey.

Keywords: Whey, *Kluyveromyces marxianus*, bioaromas, L-leucine, isoamyl acetate.

Introducción

El lactosuero es uno de los principales subproductos generados por la industria quesera y constituye una fuente importante de lactosa, proteínas, minerales y otros componentes susceptibles de aprovechamiento. Sin embargo, su manejo inadecuado continúa representando un problema ambiental, particularmente en regiones donde predominan pequeñas unidades productoras de queso y no existen procesos integrales para su valorización. En el Valle de Tulancingo, Hidalgo, una proporción importante de la producción de leche se destina a la elaboración de queso, generándose consecuentemente volúmenes considerables de lactosuero que pueden ser descargados sin un aprovechamiento adecuado (Castelán, 2020).

Entre las alternativas de valorización se encuentra su empleo como sustrato en procesos fermentativos. Su contenido de lactosa favorece el desarrollo de microorganismos capaces de metabolizar este disacárido, particularmente levaduras del género *Kluyveromyces*. *Kluyveromyces marxianus* presenta especial interés biotecnológico por su capacidad para utilizar lactosa y producir biomasa, etanol y diversos metabolitos secundarios, además de su potencial para la obtención de moléculas aromáticas naturales (Fonseca et al., 2008; Guimaraes et al., 2010; Morrissey et al., 2015; Hernández-Cruz et al., 2023).

Entre los compuestos volátiles generados durante la fermentación se encuentra el acetato de isoamilo, un éster asociado con notas aromáticas frutales y de plátano. Su obtención mediante procesos biotecnológicos representa una alternativa de interés frente a la síntesis química,

especialmente cuando se emplean subproductos agroindustriales como materia prima. Estudios previos han demostrado que *K. marxianus* puede utilizar lactosuero como sustrato y producir compuestos aromáticos, incluido acetato de isoamilo (Gómez-Aldapa et al., 2021; Hernández-Cruz et al., 2024).

La producción de este éster depende, entre otros factores, de la disponibilidad de sus precursores metabólicos. Una estrategia consiste en adicionar directamente alcohol isoamílico para favorecer su esterificación intracelular. Sin embargo, concentraciones elevadas de alcoholes superiores pueden generar estrés celular e interferir con el crecimiento y la actividad metabólica de las levaduras, por lo que la concentración del precursor constituye una variable crítica (Kavšček et al., 2015; Gómez-Aldapa et al., 2021).

Una alternativa consiste en promover la formación endógena de alcohol isoamílico mediante la suplementación con L-leucina. Este aminoácido de cadena ramificada puede metabolizarse a través de la vía de Ehrlich mediante reacciones de transaminación, descarboxilación y reducción que conducen a la formación de alcoholes superiores. Posteriormente, el alcohol isoamílico puede participar en las reacciones de esterificación que originan acetato de isoamilo. La disponibilidad de aminoácidos también puede modificar el metabolismo fermentativo, el consumo de carbohidratos y el perfil de compuestos volátiles producido por las levaduras (Hazelwood et al., 2008; Chua & Liu, 2020).

Se planteó como hipótesis que la naturaleza y concentración del precursor incorporado al lactosuero modificarían la respuesta fermentativa de *K. marxianus*, de manera que concentraciones controladas de alcohol isoamílico favorecerían directamente la síntesis de acetato de isoamilo, mientras que la L-leucina favorecería la producción endógena de alcohol isoamílico y el metabolismo fermentativo.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes concentraciones de alcohol isoamílico y L-leucina durante la fermentación de lactosuero crudo con *Kluyveromyces marxianus*, mediante el seguimiento del crecimiento celular, consumo de lactosa, pH y producción de etanol, alcohol isoamílico y acetato de isoamilo, con la finalidad de identificar las condiciones que favorecen la producción de bioaromas sin comprometer el desempeño fermentativo del microorganismo.

Materiales y Métodos

Lugar de realización. La fase experimental se realizó en el Laboratorio de Fisicoquímica de Alimentos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), Hidalgo, México.

Microorganismo y medio de cultivo. Se utilizó la levadura *Kluyveromyces marxianus* ITD00262, aislada del proceso de fermentación alcohólica de *Agave duranguensis* y proporcionada por el Laboratorio de Biotecnología del Instituto Tecnológico de Durango. La cepa se mantuvo en placas con medio lactosado y se incubó a 28 °C durante 24 h; posteriormente se almacenó a 4 °C hasta su utilización. El medio lactosado se preparó con caldo lactosado Bioxon (México), constituido por 5 g/L de lactosa, 5 g/L de peptona de gelatina y 3 g/L de extracto de carne de res, y agar para métodos estándar Bioxon (México), con 5 g/L de peptona de caseína, 2.5 g/L de extracto de levadura, 1 g/L de dextrosa y 15 g/L de agar.

Sustrato. Se empleó lactosuero dulce proveniente de la elaboración de queso tipo Panela, proporcionado por una empresa productora de lácteos localizada en Tulancingo, Hidalgo, México. El lactosuero fue recolectado directamente de la línea de producción, transportado bajo refrigeración al laboratorio, pasteurizado a 63 °C durante 30 min y almacenado a -20 °C hasta su utilización. En este trabajo, el término lactosuero crudo se utilizó para referirse al lactosuero empleado sin suplementación ni modificación adicional de su composición, excepto por la incorporación de los precursores evaluados.

Fermentaciones con precursores. Se establecieron ocho tratamientos independientes: cuatro con alcohol isoamílico (Sigma-Aldrich) en concentraciones de 0.25, 0.50, 0.75 y 1% (v/v), y cuatro con L-leucina (Nutricost) en concentraciones de 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 g/L. Cada tratamiento se realizó por triplicado en matraces Erlenmeyer de 125 mL con 50 mL de lactosuero. Para preparar el inóculo, la levadura se cultivó en 100 mL de caldo lactosado en matraces Erlenmeyer de 250 mL a 28 °C y 120 rpm durante 24 h. Posteriormente se incorporó un inóculo de $1x10^6$ células/mL, cuantificado mediante cámara de Neubauer. Las fermentaciones se incubaron a 28 °C y 120 rpm durante 144 h. Cada 12 h se obtuvieron alícuotas para evaluar biomasa, lactosa, pH, etanol, alcohol isoamílico y acetato de isoamilo.

Crecimiento celular y pH. El crecimiento de *K. marxianus* se determinó mediante conteo directo al microscopio utilizando una cámara de Neubauer (Marienfeld, Alemania). Se tomaron alícuotas de 100 µL y las células se tiñeron con azul de metileno al 0.1%, realizando las diluciones necesarias para facilitar el conteo. El pH se determinó siguiendo los lineamientos de la norma NMX-F-317-NORMEX-2013.

Determinación de lactosa. La concentración de lactosa se determinó mediante el método de azúcares reductores con ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), modificado de acuerdo con

Hortsch et al. (2008). Las muestras fueron centrifugadas y posteriormente reaccionaron con el reactivo DNS; el desarrollo de color se cuantificó a 540 nm mediante una curva de calibración elaborada con concentraciones conocidas de lactosa.

Cuantificación de metabolitos. El etanol, alcohol isoamílico y acetato de isoamilo se identificaron y cuantificaron mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-MS), empleando un cromatógrafo Agilent Technologies 7890A (Estados Unidos) acoplado a un detector Agilent Technologies 5975C Triple-Axis. Se utilizó una columna capilar FFAP PerkinElmer Elite de polietilenglicol (30 m × 0.25 mm × 0.25 µm) y helio como gas portador a 1 mL/min. El inyector se mantuvo a 250 °C en modo splitless y el detector a 230 °C y 70 eV en modo SIM. Para la preparación mediante HS-SPME, se colocaron 8 mL de muestra en viales con septum, se calentaron a 35 °C durante 5 min y se expuso una fibra de poliacrilato en el espacio de cabeza durante 60 min. La identificación y cuantificación se realizó por comparación con estándares puros de etanol, alcohol isoamílico y acetato de isoamilo.

Análisis estadístico. Los resultados se analizaron en STATISTICA versión 8.0 mediante análisis de varianza de una vía (ANOVA). Los tratamientos se realizaron por triplicado y se evaluaron como variables de respuesta la producción de biomasa, consumo de lactosa, pH y concentraciones de etanol, alcohol isoamílico y acetato de isoamilo. La comparación entre tratamientos se efectuó mediante la prueba de Tukey.

Resultados y discusión

Efecto de la adición de alcohol isoamílico

La respuesta de *K. marxianus* presentó una marcada dependencia de la concentración de alcohol isoamílico. Los tratamientos con 0.25 y 0.50% (v/v) permitieron el crecimiento de la levadura, mientras que 0.75 y 1% provocaron inhibición de la proliferación celular. El comportamiento estuvo acompañado por un consumo limitado de lactosa y escasas modificaciones del pH en las concentraciones más elevadas, evidenciando el efecto inhibitorio del alcohol sobre la actividad metabólica (Figura 1).

La concentración de 0.25% presentó el mejor equilibrio entre actividad fermentativa y utilización del sustrato. A las 96 h, la reducción de lactosa alcanzó 69.97%, frente a 39.87% con 0.50%. Los tratamientos de 0.75 y 1% presentaron reducciones considerablemente inferiores. Estos resultados indican la existencia de un intervalo de tolerancia dentro del cual el precursor puede ser aprovechado sin comprometer severamente la actividad celular.

La toxicidad de los alcoholes superiores se ha relacionado con alteraciones de las membranas celulares, el metabolismo energético y el equilibrio redox. La tolerancia de *K. marxianus* a

estos compuestos resulta, por tanto, determinante para mantener la fermentación y la formación de metabolitos de interés (Kavšček et al., 2015; Acosta-Cuevas et al., 2025).

La producción de etanol confirmó esta respuesta, la máxima producción con 0.25% fue de 13.696 ± 0.379 g/L a las 60 h, mientras que con 0.5% se alcanzaron 7.467 ± 1.109 g/L hasta las 144 h. En los tratamientos con 0.75 y 1% no se detectó producción de etanol.

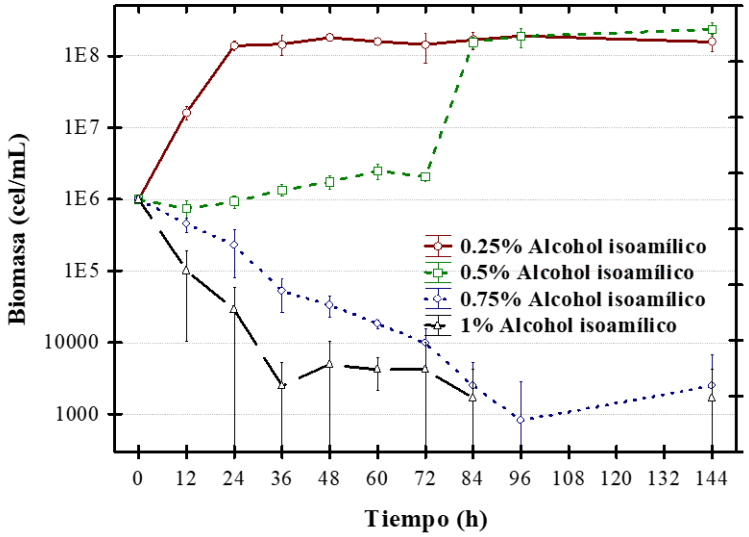


Figura 1. Cinéticas de crecimiento de *K. marxianus* durante las fermentaciones de lactosuero con adición de alcohol isoamílico a distintas concentraciones.

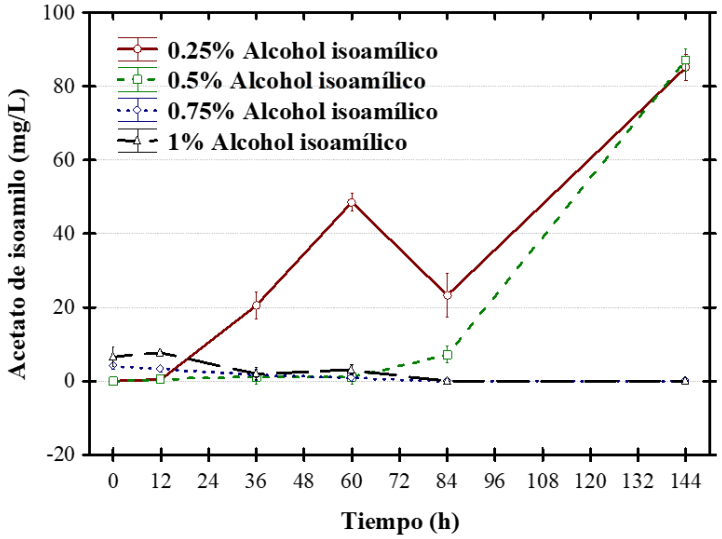


Figura 2. Cinéticas de producción de acetato de isoamilo durante las fermentaciones de lactosuero con *K. marxianus* y adición de alcohol isoamílico a distintas concentraciones.

La formación de acetato de isoamilo constituyó uno de los resultados principales, en este contexto con 0.25% se alcanzaron 85.144 ± 3.521 mg/L a las 144 h y con 0.5%, 87.094 ± 3.039 mg/L en el mismo tiempo (Figura 2). Aunque las concentraciones máximas fueron semejantes, la condición de 0.25% permitió detectar el éster desde etapas más tempranas del proceso. En contraste, con 0.75 y 1% no se detectó formación del compuesto.

Estos resultados muestran que incrementar la concentración externa del precursor no conduce necesariamente a una mayor esterificación. La formación del éster depende no solo de la disponibilidad de alcohol isoamílico, sino también de la actividad metabólica de la célula, la disponibilidad de acetil-CoA y la actividad de las alcohol acetiltransferasas. Estudios previos han demostrado que *K. marxianus* puede producir compuestos aromáticos a partir de lactosuero y que el suministro controlado de precursores modifica el rendimiento de estos metabolitos (Gómez-Aldapa et al., 2021; Hernández-Cruz et al., 2024).

Efecto de la adición de L-leucina

A diferencia del alcohol isoamílico, la incorporación de L-leucina no generó un efecto inhibitorio evidente sobre el crecimiento de *K. marxianus*. Las tasas específicas de

crecimiento fueron similares entre los tratamientos, con valores comprendidos entre 0.220 y 0.231 h^{-1}.

La concentración de L-leucina sí modificó la eficiencia de utilización de la lactosa. Las condiciones con 1.5 y 2.0 g/L mostraron una utilización particularmente elevada del disacárido; a las 96 h, las reducciones alcanzaron 99.565 y 99.699%, respectivamente (Figura 3).

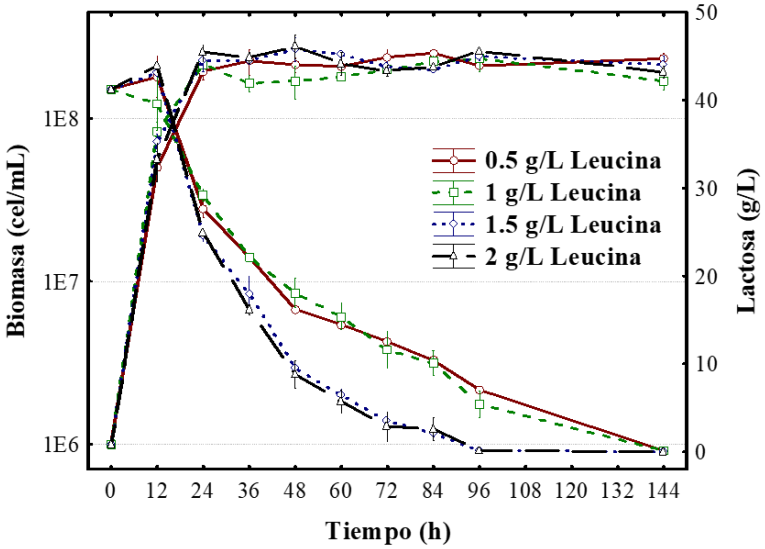


Figura 3. Cinéticas de crecimiento de *K. marxianus* y consumo de lactosa durante las fermentaciones con diferentes concentraciones de L-leucina.

La mayor utilización de lactosa puede asociarse con la disponibilidad de nitrógeno asimilable proporcionada por la L-leucina y su participación en el metabolismo celular. La suplementación con aminoácidos de cadena ramificada puede modificar tanto el consumo de carbohidratos como el perfil de compuestos aromáticos en fermentaciones realizadas con levaduras no convencionales (Chua & Liu, 2020).

La suplementación también favoreció la producción de etanol. El máximo se registró con 1.5 g/L de L-leucina, con 23.740 ± 1.567 g/L a las 60 h. Con 2.0 g/L se alcanzaron 20.776 ± 2.707 g/L, lo que muestra una respuesta no lineal frente al incremento en la concentración del aminoácido.

Una tendencia más definida se observó en la formación de alcohol isoamílico. Las concentraciones máximas fueron 0.364 ± 0.041, 0.359 ± 0.001, 0.595 ± 0.009 y 0.734 ± 0.035 g/L para 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 g/L de L-leucina, respectivamente (Figura 4).

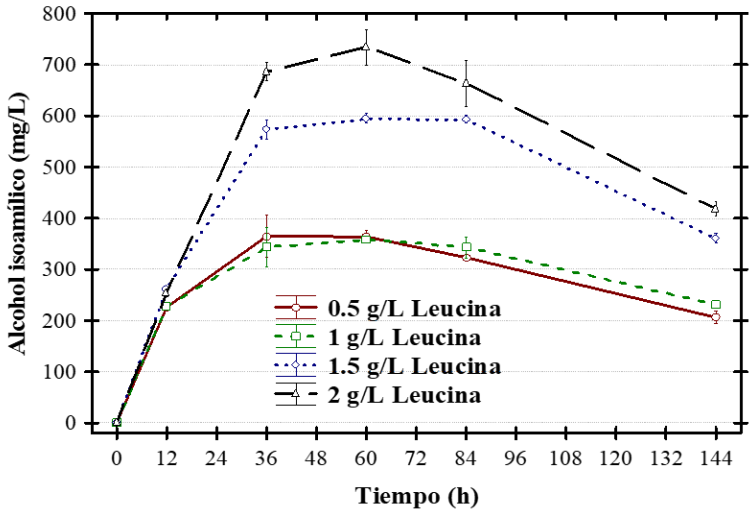


Figura 4. Cinéticas de producción de alcohol isoamílico durante las fermentaciones de lactosuero con *K. marxianus* y diferentes concentraciones de L-leucina.

Este comportamiento es congruente con la participación de la L-leucina en la vía de Ehrlich, en la que el aminoácido es convertido a α-cetoisocaproato mediante transaminación y posteriormente descarboxilado y reducido para originar alcohol isoamílico (Hazelwood et al., 2008). Los resultados evidencian que concentraciones de 1.5 y 2.0 g/L favorecen la producción endógena de este alcohol superior.

Sin embargo, la elevada generación de alcohol isoamílico no se tradujo proporcionalmente en una mayor formación de acetato de isoamilo. Los máximos fueron 4.913 ± 1.308, 4.786 ± 0.752, 6.049 ± 0.012 y 7.024 ± 0.428 mg/L para 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0 g/L, respectivamente (Figura 5).

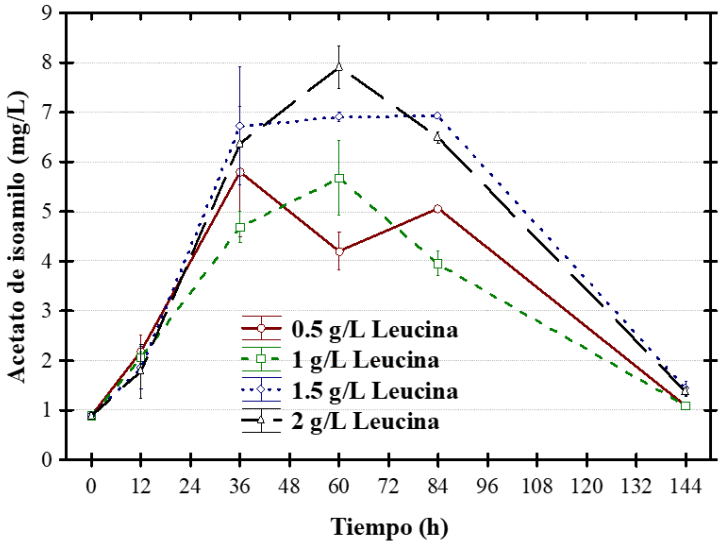


Figura 5. Cinéticas de producción de acetato de isoamilo durante las fermentaciones de lactosuero con *K. marxianus* y diferentes concentraciones de L-leucina.

Aunque la vía de Ehrlich permitió generar cantidades importantes de alcohol isoamílico, la posterior esterificación constituyó una limitante del proceso. Esta respuesta puede relacionarse con la disponibilidad intracelular de acetil-CoA, la actividad de las alcohol acetiltransferasas, el balance redox y la competencia metabólica por intermediarios celulares (Hazelwood et al., 2008).

Comparación de las estrategias de adición de precursores

El Cuadro 1 resume los principales parámetros fermentativos obtenidos con ambos precursores y evidencia las respuestas metabólicas contrastantes de *K. marxianus*.

Cuadro 1. Comparación de los principales parámetros fermentativos de *Kluyveromyces marxianus* en lactosuero con adición de alcohol isoamílico y L-leucina.

Tratamiento	Reducción de lactosa a 96 h (%)	Etanol máximo (g/L)	Alcohol isoamílico máximo (g/L)	Acetato de isoamilo máximo (mg/L)
Alcohol isoamílico 0.25 % (v/v)	69.974 ± 2.612	13.696 ± 0.379 (60 h)	NA	85.144 ± 3.521 (144 h)
Alcohol isoamílico 0.50 % (v/v)	39.874 ± 2.485	7.467 ± 1.109 (144 h)	NA	87.094 ± 3.039 (144 h)
Alcohol isoamílico 0.75 % (v/v)	6.182 ± 2.594	0	NA	NA
Alcohol isoamílico 1.00 % (v/v)	9.507 ± 6.605	0	NA	NA
L-leucina 0.50 g/L	82.917 ± 0.292	19.792 ± 0.453 (60 h)	0.364 ± 0.041 (36 h)	4.913 ± 1.308 (36 h)
L-leucina 1.00 g/L	86.898 ± 3.614	14.788 ± 2.282 (84 h)	0.359 ± 0.001 (60 h)	4.786 ± 0.752 (60 h)
L-leucina 1.50 g/L	99.565 ± 0.712	23.740 ± 1.567 (60 h)	0.595 ± 0.009 (60 h)	6.049 ± 0.012 (84 h)

Tratamiento	Reducción de lactosa a 96 h (%)	Etanol máximo (g/L)	Alcohol isoamílico máximo (g/L)	Acetato de isoamilo máximo (mg/L)
L-leucina 2.00 g/L	99.699 ± 0.459	20.776 ± 2.707 (60 h)	0.734 ± 0.035 (60 h)	7.024 ± 0.428 (60 h)

Nota: Los resultados se expresan como media ± desviación estándar de experimentos realizados por triplicado. NA: no aplica; en los tratamientos correspondientes, el alcohol isoamílico fue incorporado directamente como precursor y no se reportó como metabolito producido.

El análisis comparativo muestra que ambas estrategias presentan ventajas diferentes. La incorporación directa de alcohol isoamílico proporciona inmediatamente el precursor requerido para la esterificación y permitió alcanzar aproximadamente 85-87 mg/L de acetato de isoamilo, pero su eficacia estuvo restringida a bajas concentraciones debido a su efecto inhibitorio.

En contraste, la L-leucina fue bien tolerada y favoreció el consumo de lactosa y la producción de etanol y alcohol isoamílico. Con 1.5 y 2.0 g/L se utilizó más del 99% de la lactosa y con 2.0 g/L se alcanzaron aproximadamente 0.734 g/L de alcohol isoamílico. No obstante, la producción de acetato de isoamilo permaneció considerablemente por debajo de la obtenida mediante la adición directa del alcohol.

Por tanto, las estrategias presentan efectos complementarios. El alcohol isoamílico favorece directamente la disponibilidad del precursor para la esterificación, mientras que la L-leucina estimula el metabolismo fermentativo y permite generar alcohol isoamílico de manera endógena mediante la vía de Ehrlich. Estos resultados constituyen una base experimental para estudiar posteriormente la combinación controlada de ambos precursores.

Conclusiones

La respuesta fermentativa de *Kluyveromyces marxianus* en lactosuero dependió de la naturaleza y concentración del precursor incorporado. La adición directa de alcohol isoamílico favoreció la formación de acetato de isoamilo cuando se utilizaron concentraciones bajas, mientras que concentraciones iguales o superiores a 0.75% (v/v) comprometieron el crecimiento celular y la actividad fermentativa.

La suplementación con L-leucina presentó mayor compatibilidad con el metabolismo de *K. marxianus*, favoreciendo el consumo de lactosa y la producción de etanol y alcohol isoamílico, particularmente a concentraciones de 1.5 y 2.0 g/L. Sin embargo, la producción endógena de alcohol isoamílico no se tradujo proporcionalmente en una mayor formación de acetato de isoamilo, evidenciando una limitación en la etapa de esterificación.

En conjunto, ambas estrategias produjeron efectos complementarios: el alcohol isoamílico favoreció directamente la esterificación dentro de su intervalo de tolerancia, mientras que la L-leucina fortaleció el metabolismo fermentativo y favoreció la generación endógena del

alcohol precursor. Estos hallazgos proporcionan una base para la optimización posterior del proceso y para el desarrollo de estrategias orientadas a la producción biotecnológica de bioaromas mediante la valorización del lactosuero.

Literatura citada

Revistas científicas

Acosta-Cuevas, C. K., Páez-Lerma, J. B., Rojas-Contreras, J. A., Rodríguez-Sifuentes, L., Sánchez-Castañeda, A. K., & Soto-Cruz, N. O. (2025). Tolerance of *Kluyveromyces marxianus* under acetic acid-, isoamyl alcohol-, hydrogen peroxide-, and ethanol-induced stress. *Fermentation, 11*(4), 171. https://doi.org/10.3390/fermentation11040171

Chua, J., & Liu, S. (2020). Effect of single amino acid addition on growth kinetics and flavor modulation by *Torulaspora delbrueckii* in soy (tofu) whey alcoholic beverage fermentation. *Food Research International, 135*, 109283. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109283

Fonseca, G. G., Heinzle, E., Wittmann, C., & Gombert, A. K. (2008). The yeast *Kluyveromyces marxianus* and its biotechnological potential. *Applied Microbiology and Biotechnology, 79*(3), 339–354. https://doi.org/10.1007/s00253-008-1458-6

Gómez-Aldapa, C. A., Castro-Rosas, J., López-Molina, A., Conde-Mejía, C., Pineda-Muñoz, C. F., Jiménez-González, A., Medina-Moreno, A., Falcón-León, M. P., & Conde-Báez, L. (2021). Best conditions for the production of natural isopentyl acetate (banana aroma) from cheese industry waste: An experimental precursor approach. *Processes, 9*(11). https://doi.org/10.3390/pr9111880

Guimaraes, P. M., Teixeira, J. A., & Domingues, L. (2010). Fermentation of lactose to bio-ethanol by yeasts as part of integrated solutions for the valorisation of cheese whey. *Biotechnology Advances, 28*(3), 375–384. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.02.002

Hazelwood, L. A., Daran, J. M., van Maris, A. J., Pronk, J. T., & Dickinson, J. R. (2008). The Ehrlich pathway for fusel alcohol production: A century of research on *Saccharomyces cerevisiae* metabolism. *Applied and Environmental Microbiology, 74*(8), 2259–2266. https://doi.org/10.1128/AEM.02625-07

Hernández-Cruz, M. Á., Vázquez-Cuevas, G. M., Castro-Rosas, J., Hernández-Juárez, M., & Gómez-Aldapa, C. A. (2023). *Kluyveromyces marxianus*, sus aplicaciones en lactosuero. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI, 10*(20), 1–9. https://doi.org/10.29057/icbi.v10i20.9362

Hernández-Cruz, M. Á., Cadena-Ramírez, A., Castro-Rosas, J., Páez-Lerma, J. B., Ramírez-Vargas, M. R., Rangel-Vargas, E., Romo-Gómez, C., Lara-Gómez, A. B., Conde-Baéz,

L., & Gómez-Aldapa, C. A. (2024). Comparative analysis of three types of whey as substrate for fermentation by *Kluyveromyces marxianus* and its influence on isoamyl acetate synthesis. *Waste and Biomass Valorization, 15*, 3413–3424. https://doi.org/10.1007/s12649-023-02380-5

Hortsch, R., Löser, C., & Bley, T. (2008). A two-stage CSTR cascade for studying the effect of inhibitory and toxic substances in bioprocesses. *Engineering in Life Sciences, 8*(6), 650–657. https://doi.org/10.1002/elsc.200800072

Kavšček, M., Stražar, M., Curk, T., Natter, K., & Petrovič, U. (2015). Yeast as a cell factory: Current state and perspectives. *Microbial Cell Factories, 14*(1). https://doi.org/10.1186/s12934-015-0281-x

Morrissey, J. P., Etschmann, M. M. W., Schrader, J., & de Billerbeck, G. M. (2015). Cell factory applications of the yeast *Kluyveromyces marxianus* for the biotechnological production of natural flavour and fragrance molecules. *Yeast, 32*(1), 3–16. https://doi.org/10.1002/yea.3054

Norma

NORMEX. (2013). *NMX-F-317-NORMEX-2013. Alimentos-Determinación de pH en alimentos y bebidas no alcohólicas-Método potenciométrico-Método de prueba*. Sociedad Mexicana de Normalización y Certificación, S.C.

Referencia electrónica

Castelán, M. (2020). *Destinan más de 550 mil litros de leche para elaborar queso*. El Sol de Hidalgo. Recuperado de https://www.elsoldehidalgo.com.mx/local/destinan-mas-de-550-mil-litros-de-leche-para-elaborar-queso-5745286.html

Colonización micorrícica arbuscular asociada a raíces de *Crotalaria pallida* en suelos contaminados con petróleo crudo

Ana Guadalupe Ramírez-May[73], María del Carmen Rivera-Cruz[74], Antonio Trujillo-Narcía[75], José Alberto Orocio-Carrillo[76]

Resumen

Las actividades petroleras en el estado de Tabasco han generado impactos negativos a los ecosistemas que impiden el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, por lo tanto, el objetivo de la investigación fue evaluar el potencial de remoción de hidrocarburos totales y alcanos lineales de bajo y alto peso molecular asociados a la colonización micorrícica arbuscular en raíces de *Crotalaria pallida* propuesta como especie con potencial de fitorremediación en suelos contaminados con petróleo crudo (PC) en Tabasco, México. Se estableció un diseño experimental completamente al azar con arreglo de factores (2 × 5); dos etapas de crecimiento (vegetativa y reproductiva) y cinco dosis de PC [0 (control), 3, 15, 30 y 45 g/kg de suelo], con un total 10 tratamientos y cuatro repeticiones (n = 4). Se evaluó la colonización micorrícica y se determinaron los porcentajes de remoción de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) y alcanos lineales de bajo (AL-BPM) y alto peso molecular (AL-APM). La presencia del PC afectó la colonización micorrícica arbuscular; sin embargo, se registraron efectos acumulativos en la remoción de los HTP, AL-BPM y AL-APM, que se atribuyen a la adaptación de la leguminosa a las condiciones de estrés ocasionada por las altas dosis de PC presentes en el suelo. Por lo tanto, se puede recomendar a *C. pallida* como especie con potencial fitorremediador en suelos que puedan ser recuperados y aprovechados para las actividades agropecuarias en el sureste de México.

Palabras clave: Fitorremediación, leguminosas, simbiosis.

Abstract

73 Universidad Popular de la Chontalpa. Carretera Cárdenas-Huimanguillo Km 2 S/N, Ranchería, Invitab Paso y Playa, 86556, Cárdenas, Tabasco. México. ana.ramirez@upch.mx
74 Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina S/N Km. 3, Periférico Carlos A Molina SN, Ranchería Río Seco y Montaña, 86500 Cárdenas, Tabasco. México. mariari@upch.mx
75 Universidad Popular de la Chontalpa. Carretera Cárdenas-Huimanguillo Km 2 S/N, Ranchería, Invitab Paso y Playa, 86556, Cárdenas, Tabasco. México. trujillo.narcia@upch.mx
76 Colegio de Postgraduados Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina S/N Km. 3, Periférico Carlos A Molina SN, Ranchería Río Seco y Montaña, 86500 Cárdenas, Tabasco. México. orocio.alberto@colpos.mx

Oil activities in the state of Tabasco have generated negative impacts on ecosystems that prevent the sustainable use of natural resources, therefore, the objective of the research was to evaluate the potential for removal of total hydrocarbons and linear alkanes of low and high molecular weight associated with arbuscular mycorrhizal colonization in roots of *Crotalaria pallida* proposed as a species with phytoremediation potential in soils contaminated with crude oil (CO) in Tabasco, Mexico. A completely randomized experimental design was established with factor arrangement (2 × 5); two growth stages (vegetative and reproductive) and five doses of CO [0 (control), 3, 15, 30 and 45 g/kg of soil], with a total of 10 treatments and four replications (n = 4). Mycorrhizal colonization was evaluated and the percentages of removal of total petroleum hydrocarbons (TPH) and linear alkanes of low (LA-LMW) and high molecular weight (LA-HMW) were determined. The presence of CO affected arbuscular mycorrhizal colonization; however, cumulative effects were recorded in the removal of TPH, LA-LMW and LA-HMW, which are attributed to the adaptation of the legume to the stress conditions caused by the high doses of CO present in the soil. Therefore, *C. pallida* can be recommended as a species with phytoremediation potential in soils that can be recovered and used for agricultural activities in southeastern Mexico.

Keywords; Phytoremediation, legumes, symbiosis.

Introducción

En las últimas décadas se ha incrementado el deterioro ambiental a nivel mundial y, en México, alrededor del 48% de la vegetación predominante se ha visto afectada por la degradación del suelo (CONABIO, 2019). El manejo, distribución y transporte del petróleo crudo y sus derivados han ocasionado derrames que afectan directamente a los ecosistemas y generan problemas de salud pública (Pérez *et al.*, 2019). Del período comprendido de 2020 al 2024 se han reportado en México 5 517 emergencias ambientales relacionadas con fugas y derrames de hidrocarburos, sin contabilizar los relacionados con tomas clandestinas (PEMEX, 2024). Hasta el año 2022, el volumen total de suelo contaminado por hidrocarburos y derivados del petróleo equivale a 14 669 704.9 m^3 (Chan-Quijano *et al.*, 2025). La contaminación del petróleo crudo al suelo genera estrés oxidativo en las plantas, con efectos negativos en su crecimiento y producción, también inhibe la fertilidad, afecta las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del suelo (Mambwe *et al.*, 2021; Skrypnik *et al.*, 2021); por lo tanto, las plantas han desarrollado capacidad de respuesta ante estos factores para su crecimiento y desarrollo (Odukoya *et al.*, 2019; Rai *et al.*, 2021).

Las plantas pueden funcionar como bioacumuladoras y bioindicadoras de contaminantes por su extensa distribución tanto a nivel superficial como de raíces y respuestas específicas (Tian

et al., 2019), que contribuyen en la recuperación de suelos contaminados, con métodos no invasivos y económicos como la fitorremediación (Mojiri *et al.*, 2016). Los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) en simbiosis con las raíces de plantas, han reportado resiliencia y adaptación a condiciones de estrés como las conferidas por la presencia de contaminantes como los derivados del petróleo en el suelo (Aryal, 2024), y a su vez, contribuyen a la fijación de nitrógeno y solubilización de fósforo en leguminosas para enriquecer el suelo así como la presencia de genes asociados a la degradación de los contaminantes (Bomfim *et al.*, 2021; Panchenko *et al.*, 2021). Por lo tanto, el objetivo de la investigación fue evaluar el potencial de remoción de hidrocarburos totales y alcanos lineales de bajo y alto peso molecular asociados a la colonización micorrícica arbuscular en raíces de *Crotalaria pallida* propuesta como especie con potencial de fitorremediación en suelos contaminados con petróleo crudo en Tabasco, México.

Materiales y métodos

Se utilizó suelo franco-arcilloso sin contaminación colectado del horizonte superficial (0-30 cm) del ejido Paso y Playa, ubicado en el km. 2 de la Carretera Federal Cárdenas-Huimanguillo (UTM 15 Q 0461719 1985998) en la ciudad de Cárdenas, Tabasco, México. El suelo fue secado bajo techo y tamizado a través de malla (5 mm abertura). Las propiedades del suelo antes de realizar el experimento fueron: textura franco-arcillosa (12% arena, 51% arcilla y 37% limo), 6.1% de materia orgánica, 1.024 g/kg de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) en base seca, pH 5.5, 0.5 dS/m conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico 9.6 cmol/kg, 55.5 ppm nitrato de amonio (NH_4NO_3), 3.6% carbono orgánico, 30 ppm P disponible, 3.7 meq/100 g Ca^{+2}, 2.2 meq/100 g Mg^{+2}, 2.6 meq/100 g Na^{+2}, 0.4 meq/100 g K^{+}, 1.7 Ca^{+2}/Mg^{+2}, 0.18 K^{+}/Mg^{+2}, 2.4 Cl^{-}, 27% Na intercambiable y 1.5 relación de adsorción de Na (Rodríguez-Uribe *et al.*, 2021).

Las semillas de *Crotalaria pallida* se colectaron en la Ranchería Paso y Playa, Carretera Federal Cárdenas-Huimanguillo km. 2, Cárdenas, Tabasco, México. Se evaluaron dos etapas de crecimiento que corresponden a la etapa vegetativa (día 60) y etapa reproductiva (día 150). La viabilidad de semillas fue entre 65 y 72% de germinación, se produjeron plántulas con alturas de 3.5 ± 1.3 cm para utilizarlas en el experimento. Se utilizó petróleo crudo mediano con 25.9° API, 0.84 g/cm de gravedad específica, con 56.4% de fracción alifática, 23.7% de aromáticos y 14% de asfaltenos y resinas, obtenido del campo petrolero Cinco Presidentes ubicado en La Venta, Tabasco, México (18° 12´ 11.8” N y 94° 08´37.8” O).

Se estableció un diseño experimental completamente al azar con arreglo de factores (2 × 5); dos etapas de crecimiento (vegetativa y reproductiva) y cinco dosis de petróleo crudo [0

(control), 3, 15, 30 y 45 g/kg de suelo], con un total 10 tratamientos y cuatro repeticiones (n = 4). La unidad experimental consistió en una maceta de vidrio (14 alto × 18 cm de diámetro) con 2000 g de suelo. El PC fue pesado según la dosis (g/kg) e incorporado al suelo. La mezcla suelo + PC se homogenizó manualmente usando varilla de vidrio y 15 mL de diclorometano. Al día dos después de la mezcla suelo + PC se tomó muestra de suelo para evaluar hidrocarburos totales del petróleo (HTP), se aplicó riego y se sembró una plántula de *C. pallida* según tratamiento. Las 40 unidades experimentales se mantuvieron en invernadero durante 60 (primer corte) y 150 días (segundo corte) bajo temperatura máxima promedio 34°C y 32% de humedad de campo en suelo.

La colonización micorrícica (hifas, arbúsculos, vesículas y esporas) en raíces de *C. pallida* se estudió utilizando el método de limpieza y tinción de Phillips y Hayman (1970), y el porcentaje de colonización micorrícica se calculó para cada estructura fúngica utilizando la fórmula CM% = (NRC/NSR) (100), donde CM% es porcentaje de colonización micorrícica, NRC es número de raíces colonizadas y NSR es número de segmentos de raíces observados.

Se realizó la extracción de HTP en muestras de suelo de todos los tratamientos, con base en el método EPA 418.1 (USEPA-3540C, 1996). La concentración de HTP se obtuvo por gravimetría (Chávez-Álvarez *et al.*, 2022) y, posteriormente se determinó el contenido de alcanos lineales, con base en la longitud de la cadena se dividieron en dos grupos, los de bajo peso molecular (C15-C20) y alto peso molecular (C21-C26) (Li *et al.*, 2021) en partes por millón (ppm) por Cromatografía de Gases acoplado a Espectrometría de Masas (GC-MS) (Cam y Gagni, 2001). Finalmente, el porcentaje de remoción se determinó por diferencia de concentraciones obtenidas de cada tratamiento en etapa vegetativa y reproductiva, con la medición inicial (día 1) de experimentación.

Para el análisis estadístico se realizó la prueba de Shapiro-Wilk para demostrar la distribución normal de los datos y la prueba de Bartlett para la homogeneidad de varianzas, así como el análisis de varianza (ANOVA) a las variables evaluadas con la prueba de Duncan para la comparación de medias ($p \leq 0.05$), con el programa estadístico R Studio versión 4.2.0 (R Core Team, 2022).

Resultados y discusión

La presencia de HMA en suelos contaminados con petróleo crudo muestra diferencias estadísticas significativas con los mayores porcentajes de colonización en el tratamiento sin contaminación en ambas etapas de crecimiento (Cuadro 1). Estudios previos han demostrado que la asociación de HMA con plantas nativas puede verse afectada por factores como la

especie vegetal, su ciclo de vida (anual o perenne), factores asociados al tipo de suelo y nivel de fertilidad (Thangavel *et al.*, 2022), así como temperatura, pH, humedad del suelo, exudados de las raíces y presencia de contaminantes orgánicos como los hidrocarburos del petróleo (Alejandro-Córdova *et al.*, 2017; Phillips, 2017), que generan estrés a las plantas y pueden inhibir la colonización micorrícica. Sin embargo, la sinergia de HMA con bacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas a plantas puede influir de forma positiva para la supervivencia de las plantas en suelos contaminados y sus procesos de fitorremediación (Li *et al.*, 2023).

Cuadro 1. Porcentaje de hifas, arbúsculos, vesículas, esporas intrarradicales y colonización total en raíces de *C. pallida* expuestas a diversas concentraciones de PC durante etapas fenológicas de crecimiento.

Etapa	PC (g/kg)	Colonización (%)				
		Hifas	Arbúsculos	Vesículas	Esporas	Total
Vegetativa	0	76 bc	40 a	48 a	44 bc	52 ab
	3	77 bc	25 b	20 cd	47 ab	42 cd
	15	75 bcd	10 cd	24 bcd	32 de	35 def
	30	65 cde	22 b	23 bcd	38 cd	37 de
	45	67 cde	14 bcd	19 d	28 e	32 ef
Reproductiva	0	96 a	22 b	58 a	54 a	57 a
	3	84 b	16 bc	56 a	36 cde	48 bc
	15	64 de	4 d	25 bcd	18 f	28 f
	30	75 bcd	6 cd	34 b	32 de	37 de
	45	60 e	6 cd	31 bc	14 f	28 f

PC: petróleo crudo. [a]Letras diferentes por tratamientos indican diferencias estadísticas significativas (Duncan, $p \leq 0.05$, n = 4).

Estructuras como arbúsculos, vesículas y esporas fueron las más sensibles a la presencia del PC durante las etapas de crecimiento de *C. pallida*, lo que sugiere que la hidrofobicidad del petróleo crudo evita el paso de agua y nutrientes para que los HMA lleven a cabo sus procesos metabólicos (Weil y Brady, 2017). Asimismo, las condiciones de estrés generadas por la contaminación ocasionaron la inhibición en la formación de las estructuras fúngicas (Jongen *et al.*, 2022). Sin embargo, la presencia de hifas en todos los tratamientos indica que estas estructuras tienen la capacidad de penetrar el suelo, incluso a través de los poros más finos, lo que podría apoyar en el proceso de la fitorremediación (Ingrid *et al.*, 2016).

La remoción de HTP se incrementó conforme la etapa de crecimiento de *C. pallida* en todos los tratamientos evaluados (Figura 1), con los mayores porcentajes de remoción en suelos contaminados con dosis de hasta 30 y 45 g/kg de PC, con 74% y 65% respectivamente hasta la etapa reproductiva de *C. pallida*, lo que puede atribuirse a la capacidad de las leguminosas para remover contaminantes gracias a su gran sistema radicular que, a su vez, albergan microorganismos y enzimas que metabolizan los contaminantes para transformarlos a compuestos inocuos (Ahmed *et al.*, 2025). Asimismo, la sinergia que puede ocurrir entre HMA, microorganismos y la asociación a plantas potencia la degradación de los contaminantes (Cheng *et al.*, 2026), lo que pudo ser un factor determinante para registrar los altos valores de remoción en suelo contaminado con hasta 45 g/kg de PC con presencia de *C. pallida* después de 150 días de exposición.

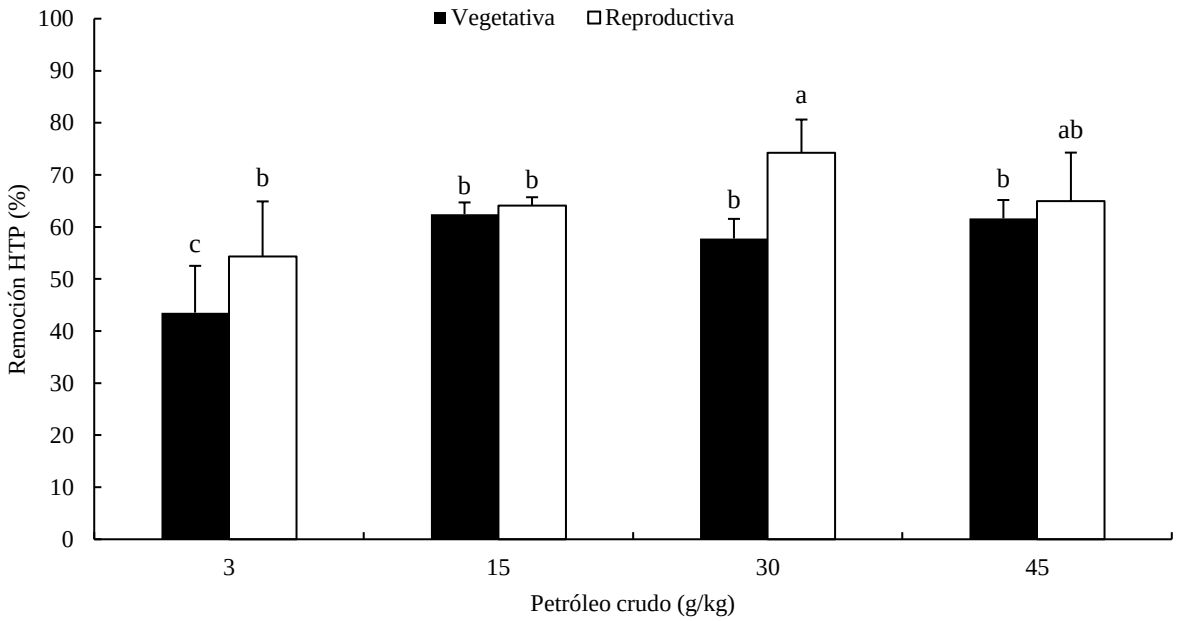
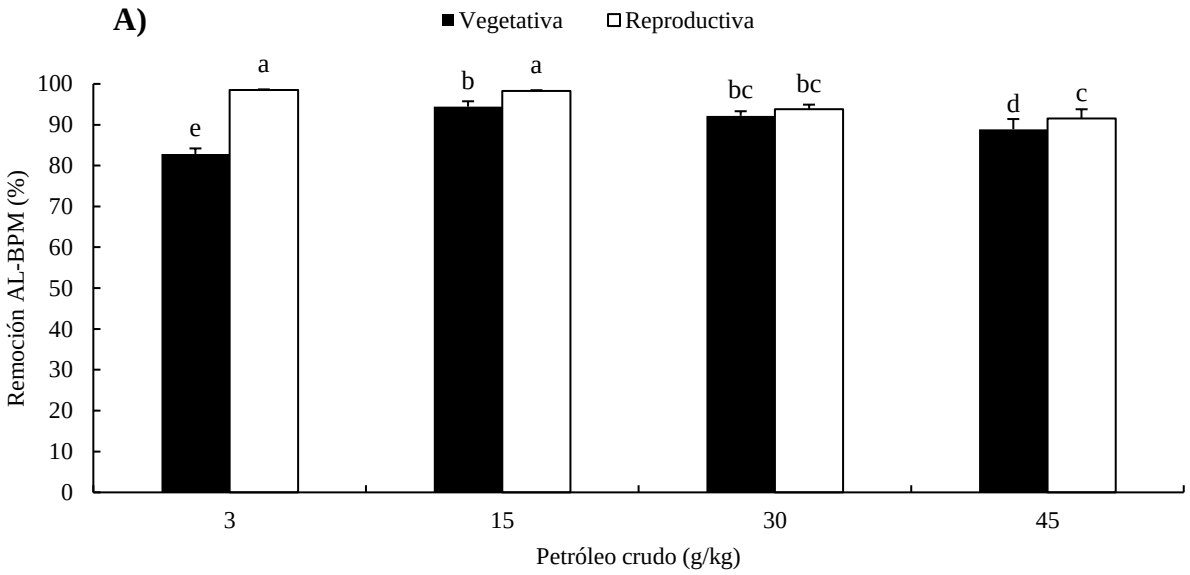


Figura 1. Remoción de hidrocarburos totales del petróleo (HTP) según la etapa de crecimiento de *C. pallida* y dosis de petróleo crudo en suelo. Medias (± error estándar) seguido de la misma letra en la columna no difieren significativamente según la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$).

Se registraron altas tasas de remoción de los alcanos lineales de bajo peso molecular (AL-BPM) y alto peso molecular (AL-APM), principalmente en dosis bajas, con 98% de remoción en AL-BPM en dosis de 3 y 15 g/kg de PC, mientras que los AL-APM registraron 91% y 94% a las mismas dosis, después de 150 días de evaluación (Figura 2A y 2B). Con base en

lo anterior, Zhang *et al.* (2019) informaron que puede ocurrir una reducción en la concentración de *n*-alcanos con C12−C18 después de 60 días de aplicación de tecnologías biológicas para limpiar suelos contaminados por PC, similar a lo ocurrido en este estudio, donde hubo remoción de alcanos con cadenas de hasta 26 carbonos en todos los tratamientos.



B)

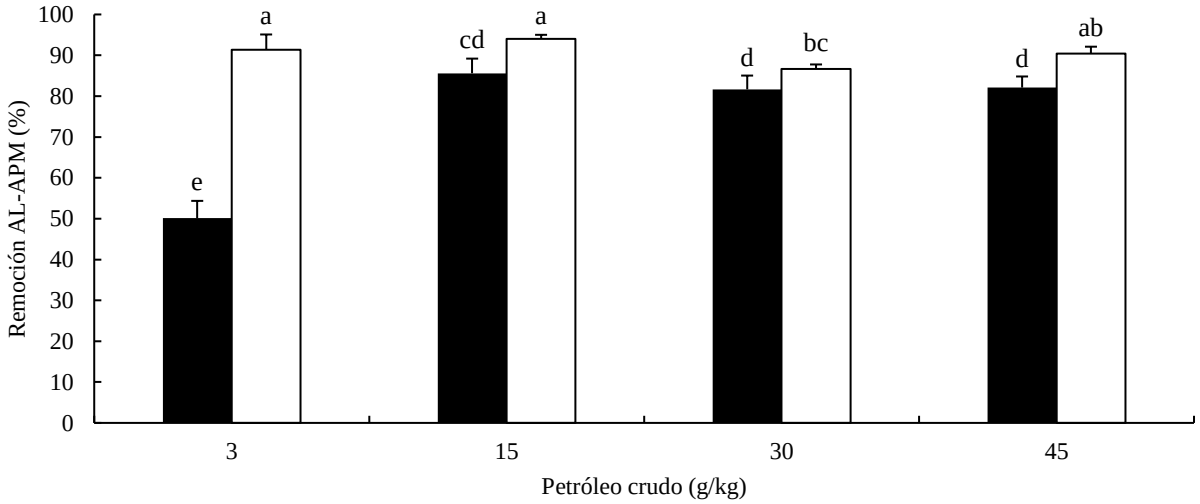


Figura 2. Remoción de alcanos lineales de bajo peso molecular (A) y alto peso molecular (B) según la etapa de crecimiento y dosis de petróleo crudo. Medias (± error estándar) con la misma letra en la columna no difieren significativamente según la prueba de Duncan ($p \leq 0.05$).

Conclusiones

La presencia de *C. pallida* en suelos contaminados con hasta 45 g/kg de petróleo crudo, mostró disminución de la colonización micorrícica arbuscular, sin embargo, se puede sugerir que la simbiosis promueve tolerancia y resistencia para que *C. pallida* se adapte a las condiciones de estrés para promover la remoción de hidrocarburos totales y alcanos lineales de bajo y alto peso molecular y, ser recomendada como especie fitorremediadora en suelos que puedan ser recuperados y aprovechados para las actividades agropecuarias en el sureste de México.

Literatura citada

Ahmed, M.M., Baba, A., Tela, G.S., Ibrahim, S. (2025). Phytodegradation potential of tiger nut (Cyperus esculentus) in remediating petroleum hydrocarbon contaminated soil. *Path of Science* **11**(2), 3001-3013. http://dx.doi.org/10.22178/pos.114-5

Alejandro-Córdova, A., Rivera-Cruz, M.C., Hernández-Cuevas, L.V., Alarcón, A., Trujillo-Narcía, A., García-de la Cruz, R. (2017). Responses of arbuscular mycorrhizal fungi and grass Leersia hexandra Swartz exposed to soil with crude oil. *Water Air Soil Pollut.* **228,** 65. https://doi.org/10.1007/s11270-017-3247-2

Bomfim, N.C.P., Aguilar, J.V., de Paiva, W.S., de Souza, L.A., Justino, G.C., Faria, G.A., Camargos, L.S. (2021). Iron phytostabilization by *Leucaena leucocephala*. *South African Journal of Botany* **138,** 318-327. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.01.013

Cam, D., Gagni, S. (2001). Determination of petroleum hydrocarbons in contaminated soils using solid-phase microextraction with Gas Chromatography-Mass Spectrometry. *J. Chromatogr. Sci.* **39,** 481-486. https://doi.org/10.1093/chromsci/39.11.481

Chan-Quijano J.G., Castro-Salazar J.I., Carpio-Domínguez J.L. (2025). Chapter 3: Historical data and situation of contaminated soils in mexico. *In:* Contaminated soils in Mexico. A green criminological approach. Springer Nature Switzerland AG. pp. 25-36. https://doi.org/10.1007/978-3-031-96480-0_3

Cheng, Y., Shi, Z., Zhao, X., Li, L. (2026). Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF)-Plant-Microbe Synergy: A Promising Strategy for Breaking the Bottleneck of PFAS Removal in Constructed Wetlands. *Water* **18,** 1504. https://doi.org/10.3390/w18121504

CONABIO (Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad). (2019). Sixth national report of Mexico to the Convention on Biological Diversity. Summary for policy makers. First edition. CONABIO/PNUD. Mexico. Pp. 55.

Ingrid, L., Lounès-Hadj S.A., Frédéric, L., Yolande, D., Joël, F. (2016). Arbuscular mycorrhizal wheat inoculation promotes alkane and polycyclic aromatic hydrocarbon biodegradation: Microcosm experiment on aged-contaminated soil. *Environmental Pollution* **213,** 549-560. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.02.056

Jongen, M., Albadran, B., Beyshlag, W., Unger, S. (2022). Can arbuscular mycorrhizal fungi mitigate drought stress in annual pasture legumes? *Plant soil* **472,** 295-310. https://doi.org/10.1007/s11104-021-05233-z

Li, J., Xu, Y., Song, Q., Yang, J., Xie, L., Yu, S., Zheng, L. (2021). Polycyclic aromatic hydrocarbon and *n*-alkane pollution characteristics and structural and functional perturbations to the microbial community: a case-study of historically petroleum-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research* **28,** 10589-10602 https://doi.org/10.1007/s11356-020-11301-1

Li, W., Li, W-B., Xing, L-J., Guo, S-X. (2023). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on microorganism of phenanthrene and pyrene contaminated soils. *International Journal of Phytoremediation* **25**(2), 240-251. https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2071832

Mambwe, M., Kalebaila, K.K., Johnson, T. (2021). Remediation technologies for oil contaminated soil. *Global Journal of Environmental Science and Management* **7**(3), 419-438. https://doi.org/10.22034/GJESM.2021.03.07

Mojiri, A., Ziyang, L., Tajuddin, R.M., Farraji, H., Alifar, N. (2016). Co-treatment of landfill leachate and municipal wastewater using the ZELIAC/zeolite constructed wetland system. *J. Environ. Manag.* **166,** 124–130. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.020

Odukoya, J., Lambert, R., Sakrabani, R. (2019). Understanding the impacts of crude oil and its induced abiotic stresses on agrifood production: a review. *Horticulturae* **5**(2), 47. https://doi.org/10.3390/horticulturae5020047

Panchenko, L., Muratova, A., Biktasheva, L., Galitskaya, P., Golubev, S., Dubrovskaya, E., Selivanovskaya, S., Turkovskaya, O. (2021). Study of *Boraginaceae* plants for phytoremediation of oil-contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation.* https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1932729

PEMEX (Petróleos Mexicanos). (2024). Informe de Sostenibilidad. Reporte Anual de Sostenibilidad. 311 p. Disponible en: https://www.pemex.com/etica_y_transparencia/transparencia/informes/Paginas/informes.aspx

Pérez M.Y., López M.S., Rodríguez L.A.R., Ramos A.S.A. (2019). Evaluación de impacto socioambiental, por derrame de petróleo de un ducto en Comalcalco, Tabasco. *Journal of Basic Sciences* **5**(15), 134-152. https://doi.org/10.19136/jobs.a5n15.3574

Phillips, J.B., Hayman, D.S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Brit. Mycol. Soc.* **55,** 158-161 https://doi.org/10.1016/s0007-1536(70)80110-3

Phillips, M. (2017). Mycorrhizal planet: how symbiotic fungi work with roots to support plant health and build soil fertility. Chelsea Green Publishing. White River Junction, Vermont, USA. pp. 256.

Rai, K.K., Pandey, N., Meena, R.P., Rai, S.P. (2021). Biotechnological strategies for enhancing heavy metal tolerance in neglected and underutilized legume crops: A comprehensive review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **208,** 111750. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111750

R Core Team. (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/

Rodríguez-Uribe, M.L., Peña-Cabriales, J.J., Rivera-Cruz, M. del C., Délano-Frier, J.P. (2021). Native bacteria isolated from weathered petroleum oil-contaminated soils in Tabasco, Mexico, accelerate the degradation petroleum hydrocarbons in saline soil microcosms. *Environmental Technology & Innovation* **23,** 101781. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101781

Skrypnik, L., Maslennikov, P., Novikova, A., Kozhikin, M. (2021). Effect of crude oil on growth, oxidative stress and response of antioxidative system of two rye (*Secale cereale* L.) varieties. *Plants* **10,** 157. https://doi.org/10.3390/plants 10010157

Thangavel, P., Anjum, N.A., Muthukumar, T., Sridevi, G., Vasudhevan, P., Maruthupandian, A. (2022). Arbuscular mycorrhizae: natural modulators of plant-nutrient relation and growth in stressful environments. *Arch. Microbiol.* **204,** 264. https://doi.org/10.1007/s00203-022-02882-1

Tian, L., Yin, S., Ma, Y., Kang, H., Zhang, X., Tan, H., Meng, H., Liu, C. (2019). Impact factor assessment of the uptake and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons by plant leaves: morphological characteristics have the greatest impact. *Sci. Total Environ.* **652,** 1149–1155. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.357

USEPA-3540C. (1996). Soxhlet extraction organics. SW-846 test methods for evaluating solid waste physical/chemical methods. http://www.epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3540c.pdf

Weil, R.R., Brady N.C. (2017). The nature and properties of soils. 15th edition. Pearson Education Limited. pp. 1104.

Zhang, B., Zhang, L., Zhang, X. (2019). Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by petroleum-degrading bacteria immobilized on biochar. *RSC Adv.* **9,** 35304. https://doi.org/10.1039/c9ra06726d

Dinámica temporal y progresión ontogénica crítica durante el desarrollo *in vitro* de *Laelia anceps*

Buendía-Espinoza Julio César[77], Martínez-Ochoa Elisa del Carmen, Mendoza-López Areli Magali[78], Martínez-Mendoza Yojari Yaretzy[79]

Resumen

Las orquídeas (Orchidaceae) representan un grupo de elevado valor ecológico y ornamental, cuyas poblaciones naturales enfrentan presiones derivadas de la pérdida de hábitat y la extracción ilegal. La germinación asimbiótica *in vitro* constituye una alternativa para su propagación y conservación; sin embargo, el desarrollo de los protocormos puede ser asincrónico y presentar diferencias entre fases ontogénicas. El objetivo fue caracterizar la dinámica temporal del desarrollo *in vitro* de *Laelia anceps* e identificar la progresión ontogénica crítica hacia estados avanzados de diferenciación protocormal. Las semillas se cultivaron en medio Murashige y Skoog con 50 % de macro y micronutrientes, suplementado con 100 mL L^{-1} de agua de coco, 30 g L^{-1} de sacarosa y 7.5 g L^{-1} de agar. El desarrollo se clasificó en cinco fases ontogénicas y se analizaron tres progresiones condicionales mediante modelos beta-binomiales con funciones spline del tiempo. El tiempo estimado para alcanzar una probabilidad condicional de progresión de 0.50 (T50) fue de 9.7 días para F2→F3+, 27.8 días para F3→F4+ y 38.4 días para F4→F5. El desfase entre las dos primeras progresiones fue de 18.1 días, superior a los 10.6 días observados entre las dos posteriores. Estos resultados identificaron F3→F4+, correspondiente al paso desde la formación inicial del protocormo hacia el desarrollo meristemático, como la principal progresión ontogénica crítica bajo las condiciones evaluadas. La evaluación temporal de las fases aporta información complementaria al porcentaje final de germinación y permite identificar etapas potencialmente relevantes para mejorar protocolos de propagación. El fortalecimiento de estos protocolos puede contribuir a la conservación ex situ de *L. anceps*, reducir la dependencia de la extracción de ejemplares silvestres y favorecer alternativas de producción sustentable para las comunidades de las regiones donde se distribuye la especie.

Palabras clave: germinación asimbiótica; *Laelia anceps*; protocormo; desarrollo meristemático; propagación *in vitro*.

[77] Universidad Autónoma Chapingo, Postgrado en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Carretera México-Texcoco, Km. 38.5, Texcoco de Mora, Estado de México, C.P. 56230, México
[78] Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia, Horticultura Protegida. Carretera México-Texcoco Km 38.5, Texcoco 56230, México
[79] Universidad Autónoma Chapingo, Área de Agronomía del departamento de Preparatoria Agrícola. Carretera México-Texcoco, Km. 38.5, Texcoco de Mora, Estado de México, C.P. 56230, México

Abstract

Orchids (Orchidaceae) represent a group of high ecological and ornamental value whose natural populations face increasing pressures from habitat loss and illegal extraction. Asymbiotic *in vitro* germination provides an alternative for their propagation and conservation; however, protocorm development may be asynchronous and differ among ontogenetic stages. This study aimed to characterize the temporal dynamics of *in vitro* development of *Laelia anceps* and identify the critical ontogenetic progression toward advanced stages of protocorm differentiation. Seeds were cultured on Murashige and Skoog medium containing 50% macro- and micronutrient concentrations and supplemented with 100 mL L^{-1} coconut water, 30 g L^{-1} sucrose, and 7.5 g L^{-1} agar. Development was classified into five ontogenetic stages, and three conditional progressions were analyzed using beta-binomial models with spline functions of time. The estimated time to reach a conditional progression probability of 0.50 (T50) was 9.7 days for F2→F3+, 27.8 days for F3→F4+, and 38.4 days for F4→F5. The time lag between the first two progressions was 18.1 days, exceeding the 10.6-day lag observed between the two subsequent progressions. These results identified F3→F4+, corresponding to the progression from initial protocorm formation to meristematic development, as the main critical ontogenetic progression under the evaluated conditions. Temporal assessment of developmental stages provides information complementary to final germination percentage and enables the identification of potentially relevant stages for improving propagation protocols. Strengthening these protocols may contribute to the ex situ conservation of *L. anceps*, reduce reliance on the extraction of wild specimens, and promote sustainable production alternatives for communities in regions where the species naturally occurs.

Keywords: asymbiotic germination; *Laelia anceps*; protocorm; meristematic development; *in vitro* propagation.

Introducción

La familia Orchidaceae constituye uno de los grupos de plantas con flor de mayor riqueza, complejidad evolutiva y diversidad a nivel mundial, representando un componente ecológico fundamental en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas forestales de México (Hágsater *et al.,* 2005). En el territorio mexicano se han identificado aproximadamente 168 géneros y entre 1,254 y 1,263 especies de orquídeas, de las cuales se estima que entre el 24 % y el 35 % son endémicas (Emeterio-Lara *et al.,* 2016). Además de su relevancia biológica al actuar como indicadoras de la salud del hábitat y constituir interacciones con polinizadores

especializados, las orquídeas silvestres representan un recurso forestal no maderable (RFNM) de enorme importancia sociocultural y económica, íntimamente ligado a tradiciones ancestrales, festividades religiosas y usos medicinales en diversas regiones del país (Menchaca & Morales, 2016).

No obstante, su relevancia, las orquídeas mexicanas enfrentan actualmente una crisis de conservación crítica e irreversible en sus poblaciones naturales. La degradación crónica de los ecosistemas provocada por el cambio de uso de suelo, la deforestación, el cambio climático y, de manera alarmante, el saqueo masivo e ilegal de ejemplares silvestres con fines ornamentales, ha conducido a numerosas especies al borde de la extinción (Flores-Palacios & Valencia-Díaz, 2007; Hernández-Muñoz *et al.,* 2013). En respuesta, la legislación ambiental mexicana, a través de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, ha clasificado a una proporción significativa de especies bajo categorías de riesgo, demandando acciones coordinadas y urgentes de conservación tanto in situ como ex situ (SEMARNAT, 2010). Especies de gran valor ornamental y tradicional del género *Laelia* (como *L. anceps*) están sujetas a una presión extractiva constante, por lo que están en alguna categoría de riesgo por la NOM-059 o reguladas internacionalmente por la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres (CITES). Esta normativa exige esquemas de propagación certificados, bajo legalización y trazabilidad para detener la sobreexplotación (CITES, 2025; Menchaca & Morales, 2016; Ramírez *et al.,* 2016).

Desde la perspectiva ecológica, la recuperación natural de las poblaciones de orquídeas se encuentra limitada por la anatomía y fisiología específica de sus semillas. Estas se caracterizan por ser menores a 560 µm de largo, por carecer de endospermo y poseer un contenido mínimo de reservas lipídicas (Arditti & Ghani, 2000; Yeung, 2017). Bajo condiciones naturales, las semillas dependen estrictamente del establecimiento de una simbiosis específica con hongos endófitos formadores de micorrizas (HEFM) que les suministren los carbohidratos y nutrientes necesarios para la germinación y el posterior desarrollo del protocormo. El protocormo es una estructura embrionaria de transición caracterizada por la división celular activa y posterior diferenciación del meristemo apical que solo se presenta en orquídeas (Rasmussen *et al.,* 2015). Debido a esta estricta dependencia y a las perturbaciones microclimáticas de su hábitat, se estima que menos del 1 % de las semillas liberadas en el medio natural logra germinar, lo que resulta en tasas de

reclutamiento extremadamente bajas (Cruz-Higareda *et al.,* 2015; Emeterio-Lara *et al.,* 2018).

En este contexto, la germinación asimbiótica *in vitro*, se ha consolidado como una herramienta eficiente para la propagación y conservación de orquídeas amenazadas (Ávila-Díaz *et al.,* 2009; Flores-Escobar *et al.,* 2008). Al proporcionar un ambiente estéril y un medio de cultivo balanceado enriquecido con macro, micronutrientes y fuentes de carbono orgánico (generalmente sacarosa), es posible sustituir la función del hongo micorrízico y obtener tasas de germinación y supervivencia superiores a las observadas in situ (Arditti & Ghani, 2000; Murashige & Skoog, 1962). La adición de sacarosa o suplementos como el agua de coco, resulta indispensable debido a la nula o reducida capacidad fotosintética de los primeros estadios de desarrollo del protocormo, actuando como sustrato metabólico para la producción de energía celular y esqueleto de carbono para la biosíntesis de macromoléculas (Siddiqui *et al.,* 2020). No obstante, la concentración de cada componente del medio de cultivo debe optimizarse para cada especie, lo cual conlleva a evaluar el desarrollo de manera cuantitativa.

No obstante, la propagación *in vitro* de orquídeas enfrenta un desafío metodológico asociado a la asincronía del proceso germinativo y del desarrollo protocormal. Incluso bajo condiciones ambientales y nutrimentales idénticas, las semillas de un mismo lote de cultivo germinan de manera asincrónica, presentándose una coexistencia de individuos en diferentes fases de desarrollo morfológico (desde semillas en imbibición hasta protocormos diferenciados con primordios foliares y raíces) a lo largo del tiempo (Aguilar-Morales & López-Escamilla, 2013). En la investigación científica y tecnológica enfocada al diseño de protocolos de propagación eficientes para programas de conservación, evaluar el éxito de un tratamiento basándose de forma exclusiva en el porcentaje final de germinación (FGP) a un tiempo fijo resulta insuficiente y limitado. Dicho enfoque estático no permite caracterizar la progresión entre fases ontogénicas ni su dinámica temporal, lo que limita la identificación de etapas en las que los individuos presentan una mayor permanencia relativa antes de alcanzar estados de desarrollo más avanzados.

Para superar esta limitación, resulta necesario analizar el desarrollo como un proceso ontogénico temporal, considerando no solo la proporción de individuos que alcanza una fase determinada, sino también la progresión relativa hacia estados sucesivamente más avanzados. Debido a que estas respuestas se expresan como proporciones derivadas de conteos y pueden presentar una variabilidad superior a la esperada bajo una distribución binomial convencional, los modelos beta-binomiales constituyen una alternativa adecuada para representar la sobredispersión presente en este tipo de datos (Harrison, 2015).

Asimismo, la incorporación de funciones flexibles del tiempo permite caracterizar trayectorias no lineales sin imponer a priori una forma funcional rígida (Harrell, 2015; Wood, 2017). Este enfoque permite estimar hitos temporales de progresión y determinar si algunas etapas del desarrollo presentan una mayor permanencia relativa que otras.

En consecuencia, resulta necesario caracterizar no solo la germinación, sino también la dinámica temporal mediante la cual los individuos progresan hacia estados ontogénicos más avanzados. La identificación de etapas con mayor permanencia relativa puede aportar información sobre los periodos críticos del desarrollo protocormal y generar indicadores cuantitativos para evaluar posteriormente estrategias de propagación. Por ello, el objetivo de este estudio fue caracterizar la dinámica temporal del desarrollo *in vitro* de *Laelia anceps* e identificar la progresión ontogénica crítica que condiciona el avance desde la germinación hacia estados avanzados de diferenciación protocormal bajo las condiciones de cultivo evaluadas. Se planteó como hipótesis que la progresión ontogénica no sería temporalmente uniforme y que alguna de las etapas posteriores a la germinación presentaría una mayor permanencia relativa, constituyendo una fase crítica para alcanzar estados avanzados de diferenciación.

Materiales y métodos

Localización de la investigación y material vegetal

La fase experimental *in vitro* fue conducida en el Laboratorio de Biotecnología de Preparatoria Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo, empleando semillas de cápsulas almacenadas en refrigeración (4°C) de *Laelia anceps*. El material vegetal se encuentra bajo resguardo de la Unidad de Manejo Ambiental para la Conservación de la Vida Silvestre "UMA Orquideario Chapingo". La UMA se encuentra dentro de la Universidad Autónoma Chapingo (19°29′33″N 98°53′26″O), en el municipio de Texcoco, Estado de México, a una altitud de 2250 m s. n. m. El clima es templado semiseco, con una temperatura media anual de 15.9 °C y una precipitación media anual de 686 mm (INEGI, 2010).

Preparación de las semillas

Previo al establecimiento *in vitro*, se determinó el porcentaje de viabilidad y calidad fisiológica de las semillas de cada cápsula mediante la prueba bioquímica de Cloruro de 2,3,5-trifeniltetrazolio (TTC; Merck, Alemania). Se pesó una muestra homogénea de aproximadamente 50 mg de semillas por especie en una balanza analítica y se colocó en cajas de Petri estériles de 60 mm de diámetro. Las semillas fueron cubiertas con una solución acuosa de TTC al 2.0% (p/v) con un pH ajustado a 6.5. Las cajas se envolvieron en papel aluminio para asegurar condiciones de oscuridad durante un periodo de 24 h.

Posteriormente, las semillas se observaron en un estereomicroscopio (Leica EZ4, zoom 350X, Alemania). Se realizó el conteo de semillas en diez campos o puntos de observación seleccionados al azar por cada caja, clasificando las semillas en tres categorías: (a) Semillas viables, caracterizadas por presentar el embrión teñido de un color rojo o rosa intenso debido a la reducción del TTC a formazán por la actividad de la cadena respiratoria mitocondrial; (b) Semillas no viables, con el embrión completamente blanco o translúcido; y (c) Semillas vanas o vacías, carentes de tejido embrionario (Hernández-Ramírez *et al.,* 2023). El porcentaje de viabilidad se calculó como el cociente entre el número de semillas viables (embriones teñidos) y el número total de semillas evaluadas, multiplicado por 100.

Para asegurar condiciones de asepsia, las semillas se desinfectaron en la campana de flujo laminar empleando el método modificado de la jeringuilla. Se introdujeron 40 mg de semillas secas en una jeringa estéril de 5 mL provista de un filtro de algodón en la boquilla para impedir la pérdida del material. Se aspiró una solución desinfectante compuesta por hipoclorito de sodio (NaClO) comercial al 5.0% de cloro activo y se adicionaron dos gotas del agente tensioactivo Tween 20 para mejorar la humectación superficial de la testa. La jeringa se agitó vigorosamente de arriba hacia abajo de forma continua durante 5 min. Transcurrido el tiempo, se expulsó la solución desinfectante y se realizaron tres enjuagues sucesivos con agua destilada estéril para retirar residuos de cloro. Finalmente, se adicionaron a la jeringa 5 mL de agua destilada estéril para mantener las semillas en suspensión homogénea.

Siembra y medio de cultivo

Para la siembra se utilizó medio de cultivo MS (Murashige & Skoog, 1962), preparando al 50% de la concentración de macro y micronutrientes y con la concentración de vitaminas, suplementando con 100mL L^{-1} de agua de coco, 30 g L^{-1} de sacarosa, 7.5 g L^{-1} de agar. El pH se ajustó a 5.2±0.1. En cajas de Petri de 60 x 15 mm se vertieron 25mL de medio de cultivo, el cual se esterilizó a 120 °C y 1.1 kg cm^{-2} de presión por 20 min. Todo el material que se utilizó en la siembra, como pinzas, espátulas y frascos con agua destilada, se esterilizó previamente. Para el estudio de la germinación y desarrollo de protocormos, se sembró una alícuota de 0.5mL de la solución de semillas suspendidas por cada caja de Petri. Las cajas se sellaron herméticamente con plástico adherente y se colocaron en el área de incubación bajo condiciones controladas de temperatura de 24 ± 1 °C, fotoperiodo de 16 h de luz y 8 de oscuridad, e intensidad lumínica de 32 µmol m^{-2} s^{-1} provista por lámparas LED de color blanco frío.

Registro de variables: Fases de desarrollo y porcentaje de germinación

Durante el cultivo se registraron 60 campos de observación distribuidos entre cinco cajas de Petri, consideradas como repeticiones experimentales. En cada caja se seleccionaron al azar 12 campos de visión para su evaluación mediante un microscopio estereoscópico (Leica EZ4, 350X). Las evaluaciones se realizaron del 2 de marzo al 26 de abril de 2026, comprendiendo un periodo de seguimiento de 54 días desde la primera evaluación. Para el análisis temporal se utilizó el número real de días transcurridos desde dicha evaluación, considerada como día 0. En cada campo se registró el número de individuos observados en cada fase de desarrollo, de acuerdo con la clasificación establecida para orquídeas por Damon *et al.* (2014) y Hernández-Ramírez *et al.* (2023): Fase 1 (F1): semilla viable con embrión, Fase 2 (F2): imbibición y agrandamiento del embrión (pregerminación), Fase 3 (F3): ruptura de la testa y formación inicial del protocormo, Fase 4 (F4): desarrollo del meristemo apical en uno de los polos del protocormo y Fase 5 (F5): aparición de rizoides (pequeños pelos absorbentes) y/o brote del primer primordio foliar (u hoja rudimentaria). Estas definiciones se mantuvieron de manera consistente en el procesamiento de los datos, la modelación estadística y la interpretación de las progresiones ontogénicas.

El porcentaje de germinación se calculó considerando la proporción de semillas que alcanzaron F3 o una fase ontogénica posterior (F3–F5) respecto del número total de semillas contabilizadas, multiplicada por 100. El porcentaje correspondiente a cada fase de desarrollo se calculó como el cociente entre el número de individuos observados en la fase respectiva y el número total de individuos clasificados en F1–F5, multiplicado por 100.

Análisis estadístico y modelación de la progresión ontogénica

Los campos microscópicos de observación se consideraron submuestras dentro de cada unidad experimental, mientras que cada caja de Petri se consideró una repetición experimental. Para cada fecha de evaluación y repetición, los conteos registrados en los campos observables se agregaron de acuerdo con cinco fases ontogénicas descritas. Los campos sin una observación válida se trataron como datos faltantes y no como conteos iguales a cero. Las observaciones válidas de la repetición 2 se conservaron hasta la evaluación previa a la contaminación de la unidad experimental, mientras que las evaluaciones posteriores se consideraron datos faltantes.

La dinámica ontogénica se describió inicialmente mediante la proporción de individuos observados en cada fase respecto del total de individuos clasificados en F1–F5 en cada fecha de evaluación. Posteriormente, para caracterizar la progresión ontogénica se definieron tres contrastes condicionales entre estados sucesivos: F2→F3+, correspondiente a la proporción de individuos en F3–F5 respecto del total en F2–F5; F3→F4+, correspondiente a la proporción de individuos en F4–F5 respecto del total en F3–F5; y F4→F5, correspondiente

a la proporción de individuos en F5 respecto del total en F4–F5. De acuerdo con las definiciones ontogénicas utilizadas, estos contrastes representan, respectivamente, la progresión desde la imbibición y el agrandamiento embrionario hacia la ruptura de la testa y estados posteriores; la progresión desde la ruptura de la testa y formación inicial del protocormo hacia el desarrollo del meristemo apical y estados posteriores; y la progresión desde el protocormo con desarrollo meristemático hacia la aparición de rizoides y/o del primer primordio foliar. Debido a que los individuos no fueron identificados y seguidos longitudinalmente, estas probabilidades se interpretaron como cambios en la composición ontogénica de la población observada y no como probabilidades o tiempos de transición individual.

Para cada contraste de progresión se ajustó un modelo beta-binomial con función de enlace logit. Los conteos de individuos presentes en las fases definidas como progresión para cada contraste se especificaron como éxitos, mientras que los individuos presentes en la fase precedente se consideraron permanencias. La distribución beta-binomial se utilizó debido a su capacidad para representar sobredispersión en datos binomiales, es decir, variabilidad superior a la esperada bajo una distribución binomial convencional (Harrison, 2015). Esta estructura permitió representar la heterogeneidad extra-binomial de los conteos proporcionales y evitar una estimación excesiva de la precisión asociada con los parámetros del modelo.

La relación entre la probabilidad condicional de progresión y el tiempo, expresado como días transcurridos desde la primera evaluación, se modeló mediante un spline cúbico natural con tres grados de libertad. Los splines permiten representar relaciones no lineales entre una variable respuesta y un predictor continuo sin imponer una forma funcional rígida a priori (Harrell, 2015; Wood, 2017). El uso de tres grados de libertad proporcionó una representación parsimoniosa de la trayectoria temporal, permitiendo flexibilidad suficiente para describir cambios no lineales sin incrementar innecesariamente la complejidad del modelo. La repetición se incorporó como efecto fijo de bloqueo para controlar las diferencias sistemáticas entre las cinco cajas de Petri.

Para la repetición j y tiempo de evaluación t, el número de individuos que alcanzó la fase definida como éxito en cada progresión ontogénica condicional se modeló mediante una distribución beta-binomial:

$$Y_{jt} \sim BetaBinomial(n_{jt}, p_{jt}, \phi)$$

donde Y_{jt} representa el número de individuos clasificados en la fase de éxito de la progresión evaluada, n_{jt} es el número total de individuos incluidos en el contraste correspondiente, p_{jt} es la probabilidad condicional de progresión y ϕ es el parámetro de dispersión de la

distribución beta-binomial. La relación entre p_{jt} y el tiempo se especificó mediante una función de enlace logit y un spline natural del tiempo con tres grados de libertad. El predictor lineal se expresó como:

$$logit(p_{jt}) = \beta_0 + \sum_{k=1}^{3} \beta_k B_k(t) + \gamma_j$$

Donde β_0 es el intercepto, $B_k(t)$ representa las funciones base del spline natural del tiempo, β_k corresponde a sus coeficientes y γ_j representa el efecto fijo de bloqueo asociado con la repetición j.

Para el contraste F4→F5, el ajuste se restringió al periodo iniciado en el día 16, momento a partir del cual F4 se encontraba representada en las cinco unidades experimentales. Esta restricción evitó que proporciones derivadas de denominadores extremadamente pequeños durante las primeras evaluaciones ejercieran una influencia desproporcionada sobre la trayectoria temporal estimada.

A partir de cada modelo se estimaron probabilidades condicionales sobre una malla temporal con incrementos de 0.1 días. Las predicciones se calcularon para cada una de las cinco repeticiones y posteriormente se promediaron para obtener curvas estandarizadas sobre las unidades experimentales. La incertidumbre de las predicciones se cuantificó mediante 3000 simulaciones paramétricas de los coeficientes de efectos fijos, generadas a partir de una distribución normal multivariada definida por las estimaciones de los coeficientes y su matriz de varianza-covarianza (Venables y Ripley, 2002).

A partir de las curvas estandarizadas se estimaron los tiempos correspondientes al primer cruce ascendente de probabilidades condicionales de 0.10, 0.25 y 0.50, denominados T10, T25 y T50, respectivamente. Los tiempos de cruce se determinaron mediante interpolación lineal entre puntos consecutivos de la malla temporal. Los intervalos de confianza del 95 % de estos hitos se obtuvieron mediante los percentiles 2.5 y 97.5 de las distribuciones derivadas de las simulaciones paramétricas.

Para cuantificar la separación temporal entre progresiones ontogénicas sucesivas se calcularon los desfases entre los T50:

$$\Delta_1 = T50_{F3\rightarrow F4+} - T50_{F2\rightarrow F3+}$$

y

$$\Delta_2 = T50_{F4\rightarrow F5} - T50_{F3\rightarrow F4+}$$

Adicionalmente, se calculó el contraste $D = \Delta_1 - \Delta_2$, de manera que valores positivos de D indicaron una mayor separación temporal entre F2→F3+ y F3→F4+ que entre F3→F4+ y F4→F5. La incertidumbre asociada con los desfases y con su contraste se estimó mediante las simulaciones paramétricas utilizadas para obtener los T50. Debido a que los tres modelos de progresión fueron ajustados por separado, los intervalos correspondientes a estos contrastes se consideraron aproximaciones basadas en simulación paramétrica y no una prueba inferencial conjunta que incorporara explícitamente la covarianza entre los modelos.

La convergencia de los modelos se verificó mediante el código de convergencia y la positividad definida del Hessiano. Como diagnóstico complementario se examinaron los residuos de Pearson y, para el contraste F3→F4+, se evaluó descriptivamente la autocorrelación residual de primer orden dentro de cada repetición. Los modelos beta-binomiales se ajustaron mediante el paquete glmmTMB (Brooks *et al.,* 2017); los splines naturales se construyeron mediante las funciones del paquete splines, y las simulaciones multivariadas de los coeficientes se realizaron mediante MASS (Venables y Ripley, 2002) en el ambiente estadístico R.

Resultados y discusión

Dinámica temporal de las fases ontogénicas

La composición ontogénica de *Laelia anceps* mostró cambios marcados durante el periodo de evaluación (Figura 1). En las primeras evaluaciones predominó F2 (hinchamiento), con una participación menor de F1 (embrión), mientras que F3 (ruptura de testa y formación inicial del protocormo) presentó inicialmente una frecuencia reducida. Posteriormente, la proporción correspondiente a F2 disminuyó de manera pronunciada, en paralelo con un incremento de F3, que se convirtió en la fase predominante durante la primera parte del periodo de evaluación.

Este patrón es congruente con la secuencia general del desarrollo temprano descrita para Orchidaceae, en la cual el agrandamiento del embrión precede a la ruptura de la testa y a la formación del protocormo. Particularmente, el estudio anatómico de especies de Laeliinae realizado por Gallo *et al.* (2016), que incluyó a *L. anceps*, mostró que durante las primeras etapas del desarrollo *in vitro* el embrión se diferencia en un protocormo en el que posteriormente se reconocen rizoides y tejido meristemático. Por tanto, el reemplazo progresivo del predominio de F2 por F3 observado en este estudio es consistente con la secuencia ontogénica descrita para la especie y otros representantes de Laeliinae.

La representación de F3 alcanzó sus valores más elevados durante las evaluaciones intermedias y posteriormente disminuyó conforme aumentó la proporción de individuos observados en F4 (desarrollo meristemático). Esta fase apareció después de F3 y aumentó progresivamente hasta representar una fracción importante de los individuos observados. F5 (aparición de rizoides y/o primordio foliar) se registró más tardíamente y alcanzó su mayor representación durante las evaluaciones avanzadas. En conjunto, la sucesión temporal de los máximos relativos de F2, F3, F4 y F5 evidenció un desplazamiento progresivo de la composición poblacional hacia estados ontogénicos más avanzados.

La aparición secuencial de estructuras meristemáticas y posteriormente de órganos vegetativos coincide igualmente con la ontogenia descrita para Laeliinae. Gallo *et al.* (2016) observaron que el tejido meristemático se diferencia en el protocormo y da origen posteriormente a los primordios vegetativos, mientras que la raíz primaria se desarrolla después de la emergencia de las primeras hojas. Esta correspondencia respalda la interpretación de F4 y F5 como estados sucesivamente más avanzados del desarrollo, aunque su coexistencia temporal muestra que la población cultivada no progresó de manera completamente sincronizada
En las últimas evaluaciones se observaron nuevamente individuos clasificados en fases anteriores junto con individuos en F4 y F5, por lo que la distribución de las fases no mostró un reemplazo completo y monotónico de un estado por el siguiente. Debido a que las observaciones correspondieron a la composición de la población en cada fecha y no al seguimiento de individuos identificados, estas variaciones se interpretaron como cambios temporales en la distribución relativa de las fases ontogénicas.

La coexistencia de diferentes estados de desarrollo tiene una implicación metodológica importante para la evaluación de protocolos de propagación. Los estudios disponibles para especies de *Laelia* muestran que germinación y desarrollo posterior constituyen respuestas diferenciables y que ambas pueden depender de la composición del medio. En una revisión de los protocolos de cultivo *in vitro* del género, Teixeira da Silva *et al.* (2022) documentaron diferencias interespecíficas en la respuesta a medios basales y suplementos durante la germinación y el desarrollo de plántulas. Asimismo, en *L. anceps* se han desarrollado protocolos específicos de germinación asimbiótica y propagación posterior, lo que evidencia

la necesidad de distinguir el establecimiento inicial de la semilla del desarrollo subsiguiente del material germinado (Vera-Aguilar *et al.,* 2022).

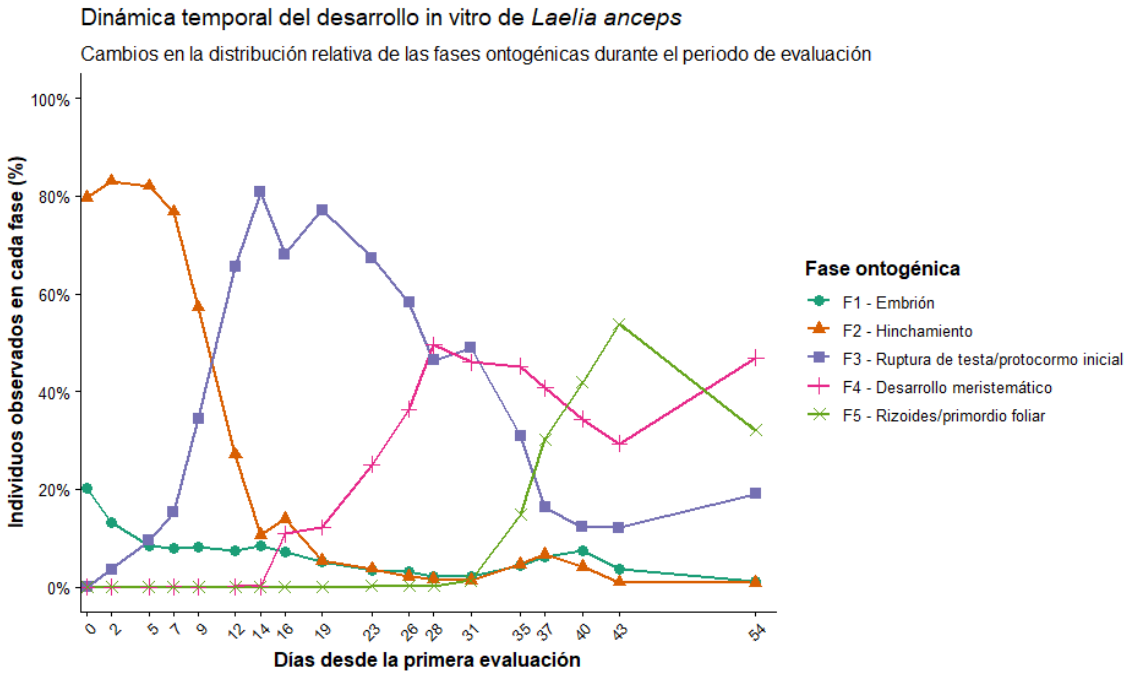


Figura 1. Dinámica temporal del desarrollo in vitro de Laelia anceps durante 54 días de evaluación. Se presenta la distribución relativa de los individuos observados en cinco fases ontogénicas: F1, embrión; F2, hinchamiento; F3, ruptura de testa y formación inicial del protocormo; F4, desarrollo meristemático; y F5, aparición de rizoides y/o primordio foliar. Los porcentajes corresponden a la proporción de individuos observados en cada fase respecto del total clasificado en F1–F5 en cada día de evaluación.

Progresión ontogénica modelada

Los modelos beta-binomiales mostraron diferencias en la dinámica temporal de las tres progresiones ontogénicas evaluadas (Figura 2). La progresión F2→F3+ presentó el incremento más temprano, alcanzando probabilidades condicionales de 0.10, 0.25 y 0.50 a los 5.4 días (IC95 %: 4.9–5.8), 7.5 días (7.1–7.8) y 9.7 días (9.5–10.0), respectivamente. La probabilidad estimada aumentó rápidamente durante las primeras evaluaciones y posteriormente se mantuvo próxima a su valor máximo.

La rapidez relativa de F2→F3+ indica que, bajo las condiciones evaluadas, el paso desde el hinchamiento embrionario hacia la ruptura de la testa y formación inicial del protocormo no

constituyó la etapa de mayor duración del proceso. La germinación asimbiótica ha demostrado ser viable en diferentes especies de *Laelia*, aunque su magnitud depende tanto de la especie como de la composición del medio de cultivo. Teixeira da Silva *et al.* (2022) señalan que los medios Knudson C y Murashige y Skoog se encuentran entre los más empleados para la germinación asimbiótica del género y que las respuestas pueden modificarse con la concentración de nutrientes y la incorporación de fuentes orgánicas. Para *L. anceps*, también se han reportado protocolos específicos de germinación asimbiótica y propagación *in vitro* (Vera-Aguilar *et al.,* 2022).

La progresión F3→F4+ presentó una trayectoria temporal desplazada hacia evaluaciones posteriores y un incremento más gradual. Los tiempos estimados para alcanzar probabilidades condicionales de 0.10, 0.25 y 0.50 fueron de 18.0 días (IC95 %: 16.8–19.3), 22.2 días (20.9–23.4) y 27.8 días (26.7–29.1), respectivamente. Por tanto, el 50 % de probabilidad condicional de observar individuos con desarrollo meristemático o en fases posteriores entre aquellos clasificados en F3 o fases más avanzadas se alcanzó aproximadamente 18 días después del T50 correspondiente a F2→F3+.

El mayor desplazamiento temporal de F3→F4+ adquiere especial relevancia biológica porque esta progresión comprende el paso desde la ruptura de la testa y formación inicial del protocormo hacia el establecimiento visible del desarrollo meristemático. El protocormo constituye una estructura característica del desarrollo temprano de las orquídeas y su diferenciación meristemática precede a la formación de los órganos de la futura plántula. En *L. anceps* y otras especies de Laeliinae, Gallo *et al.* (2016) observaron anatómicamente que durante el desarrollo temprano el embrión origina un protocormo con tejido meristemático y rizoides, sobre el cual posteriormente se forman los primordios vegetativos. En consecuencia, el retraso relativo detectado en F3→F4+ no representa únicamente una diferencia estadística entre curvas, sino que coincide con una etapa morfogenética fundamental de la formación de foliolos y rizoides (plántula).

La progresión F4→F5, modelada a partir del día 16, mostró un incremento posterior y relativamente pronunciado. Los valores estimados fueron 32.7 días (IC95 %: 31.7–33.4) para T10, 35.0 días (34.2–35.7) para T25 y 38.4 días (37.4–40.0) para T50. La probabilidad condicional modelada continuó aumentando después del T50, alcanzó un máximo durante las evaluaciones posteriores y disminuyó hacia el final del periodo. Este descenso representa

un cambio en la composición relativa F4–F5 observada en las evaluaciones finales y no una reversión ontogénica individual.

Aunque F4→F5 presentó el T50 absoluto más tardío, su incremento relativamente rápido una vez establecida F4 sugiere que la aparición de rizoides y/o del primordio foliar no constituyó necesariamente la mayor limitación temporal del desarrollo. La secuencia es consistente con las observaciones anatómicas de Laeliinae, en las que la diferenciación del protocormo precede a la formación de estructuras vegetativas (Gallo *et al.,* 2016). El descenso de la probabilidad modelada hacia el final del periodo debe interpretarse con cautela, ya que las observaciones representan composiciones poblacionales sucesivas y no trayectorias individuales; por ello, no constituye evidencia de regresión desde F5 hacia F4.

Cuadro 1. Hitos temporales de la progresión ontogénica

Progresión ontogénica	T10, días (IC95 %)	T25, días (IC95 %)	T50, días (IC95 %)
F2→F3+	5.4 (4.9–5.8)	7.5 (7.1–7.8)	9.7 (9.5–10.0)
F3→F4+	18.0 (16.8–19.3)	22.2 (20.9–23.4)	27.8 (26.7–29.1)
F4→F5	32.7 (31.7–33.4)	35.0 (34.2–35.7)	38.4 (37.4–40.0)

Nota: T10, T25 y T50 corresponden al tiempo estimado, expresado en días desde la primera evaluación, en el que la probabilidad condicional modelada alcanzó 0.10, 0.25 y 0.50, respectivamente. Entre paréntesis se presentan los intervalos de confianza del 95 % obtenidos

mediante simulación paramétrica. Las probabilidades fueron estandarizadas sobre las cinco repeticiones. Para F4→F5, la modelación se realizó a partir del día 16.

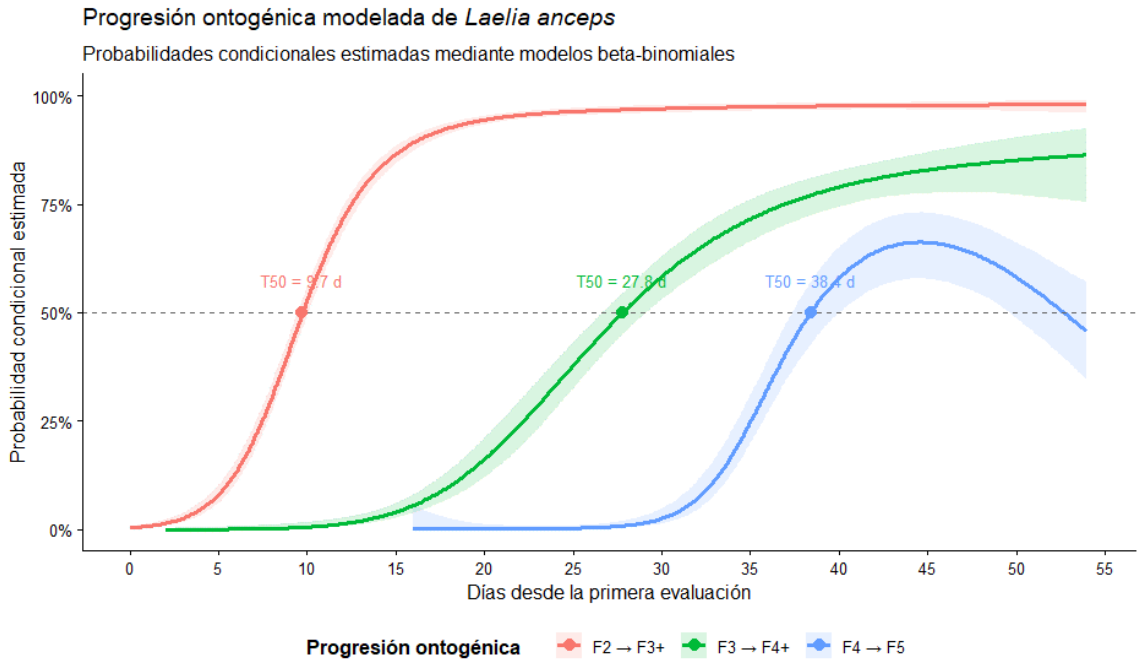


Figura 2. Progresión ontogénica modelada de *Laelia anceps* durante el cultivo asimbiótico *in vitro*. Las curvas representan las probabilidades condicionales estimadas mediante modelos beta-binomiales para las progresiones F2→F3+, F3→F4+ y F4→F5; las bandas sombreadas representan los intervalos de confianza del 95 %. Los puntos indican el tiempo estimado para alcanzar una probabilidad condicional de 0.50 (T50): 9.7, 27.8 y 38.4 días, respectivamente. Para F4→F5, la modelación se realizó a partir del día 16, cuando F4 se encontraba representada en las cinco unidades experimentales. Las probabilidades corresponden a la composición ontogénica observada y no a transiciones de individuos seguidos longitudinalmente.

Identificación de la progresión ontogénica crítica

La comparación de los T50 mostró que la separación temporal entre F2→F3+ y F3→F4+ fue de 18.1 días, con un intervalo aproximado basado en simulación de 16.9–19.4 días. En contraste, la separación entre F3→F4+ y F4→F5 fue de 10.6 días (8.9–12.6). En

consecuencia, el primer desfase fue aproximadamente 1.7 veces el observado entre las dos progresiones posteriores.

La diferencia entre ambos desfases se estimó en 7.4 días, con un intervalo aproximado basado en simulación paramétrica de 4.6–10.3 días. El contraste permaneció positivo en el 100 % de las simulaciones realizadas. Este resultado indica que la separación temporal asociada con F3→F4+ fue consistentemente mayor que la correspondiente a F4→F5 bajo el esquema de modelación utilizado.

En conjunto, la dinámica observada y las probabilidades condicionales modeladas identificaron F3→F4+ como la principal progresión ontogénica crítica durante el periodo evaluado, operacionalmente definida por el mayor desfase entre T50 sucesivos. Biológicamente, este contraste corresponde a la progresión desde la ruptura de la testa y formación inicial del protocormo (F3) hacia el desarrollo meristemático o fases posteriores (F4+).

Aunque F4→F5 presentó el T50 absoluto más tardío, su incremento relativamente rápido una vez establecida F4 sugiere que la aparición de rizoides y/o del primordio foliar no constituyó necesariamente la mayor limitación temporal del desarrollo. La secuencia es consistente con las observaciones anatómicas de Laeliinae, en las que la diferenciación del protocormo precede a la formación de estructuras vegetativas (Gallo *et al.,* 2016). El descenso de la probabilidad modelada hacia el final del periodo debe interpretarse con cautela, ya que las observaciones representan composiciones poblacionales sucesivas y no trayectorias individuales; por ello, no constituye evidencia de regresión desde F5 hacia F4.

Este resultado también tiene implicaciones para la evaluación de medios de propagación *in vitro*. Los estudios en *Laelia* indican que una formulación capaz de promover germinación no necesariamente produce la misma respuesta durante las etapas posteriores del desarrollo. La revisión de Teixeira da Silva *et al.* (2022) muestra que la respuesta a la composición del medio varía entre especies y etapas del cultivo, mientras que Mayo-Mosqueda *et al.* (2020), trabajando con *L. rubescens*, evaluaron separadamente la germinación asimbiótica y el crecimiento posterior de las plántulas, encontrando respuestas diferenciadas a los componentes del medio. En consecuencia, la eficiencia de un protocolo de propagación debería evaluarse no solo por el porcentaje de germinación alcanzado, sino también por la

capacidad de los individuos germinados para progresar hacia estados morfológicos más avanzados.

El agua de coco constituye uno de los suplementos orgánicos utilizados en el cultivo *in vitro* de Orchidaceae y su efecto puede abarcar diferentes etapas del desarrollo. En *Cypripedium macranthos*, Huh *et al.* (2016) encontraron que la incorporación de 100 mL L^{-1} de agua de coco produjo las mayores tasas de germinación y formación de protocormos entre los suplementos orgánicos evaluados, además de favorecer el desarrollo posterior de brotes. En especies de *Laelia* también se han evaluado suplementos orgánicos durante la propagación *in vitro*, aunque las respuestas dependen de la especie y de la etapa del cultivo (Mayo-Mosqueda *et al.,* 2020; Teixeira da Silva *et al.,* 2022). Sin embargo, dado que en el presente estudio no se incluyó un tratamiento sin agua de coco ni concentraciones alternativas del suplemento, no es posible atribuir causalmente al agua de coco la dinámica temporal observada ni la aparición de F3→F4+ como progresión crítica. Los resultados deben interpretarse específicamente como la respuesta ontogénica registrada bajo las condiciones de cultivo evaluadas.

Cuadro 2. Desfases entre los T50 de las progresiones ontogénicas.

Comparación	Desfase, días (intervalo aproximado 95 %)
F2→F3+ a F3→F4+	18.1 (16.9–19.4)
F3→F4+ a F4→F5	10.6 (8.9–12.6)
Diferencia entre desfases, DD	7.4 (4.6–10.3)

Nota: Los intervalos corresponden a aproximaciones obtenidas mediante simulación paramétrica. Debido a que las progresiones fueron modeladas por separado, estos intervalos no incorporan explícitamente toda la covarianza entre modelos. La proporción de simulaciones con \(D>0\) fue 1.000; este valor representa la proporción de contrastes simulados positivos y no corresponde a un valor de p.

Desde una perspectiva aplicada, la identificación de F3→F4+ como la progresión de mayor duración relativa sugiere que la evaluación de protocolos de propagación de *L. anceps* no debería limitarse al porcentaje final de germinación. Un protocolo puede permitir una rápida ruptura de la testa y formación inicial del protocormo sin garantizar una progresión igualmente rápida hacia el desarrollo meristemático. En este sentido, los hitos temporales derivados de las curvas de progresión, particularmente el T50 de F3→F4+, constituyen indicadores cuantitativos potencialmente útiles para comparar formulaciones de medios de cultivo en experimentos posteriores. Esta aplicación requerirá diseños comparativos que

permitan determinar si modificaciones en la composición nutrimental o en los suplementos orgánicos reducen efectivamente la duración de esta fase crítica.

No obstante, F3→F4+ debe considerarse una progresión ontogénica crítica operacional, identificada a partir del mayor desfase temporal entre los T50 modelados, y no un cuello de botella fisiológico demostrado. Debido a que los individuos no fueron identificados y seguidos longitudinalmente, las probabilidades estimadas representan cambios en la composición ontogénica de las unidades experimentales. Estudios posteriores que combinen seguimiento individual, caracterización anatómica y comparación experimental de medios permitirán determinar los mecanismos fisiológicos y nutrimentales asociados con la permanencia relativa en F3.

Conclusiones

La progresión ontogénica *in vitro* de *Laelia anceps* fue heterogénea y asincrónica. La progresión F3→F4+, correspondiente al paso desde la ruptura de la testa y formación inicial del protocormo hacia el desarrollo meristemático, presentó el mayor desfase entre los T50 sucesivos y se identificó como la principal progresión crítica bajo las condiciones evaluadas. Los resultados muestran que el porcentaje final de germinación no es suficiente para evaluar el desarrollo *in vitro* de la especie. Los tiempos T10, T25 y T50 permiten identificar etapas críticas y constituyen indicadores útiles para comparar y mejorar protocolos de propagación en investigaciones posteriores.

La identificación de la fase crítica aporta una base científica para mejorar la propagación ex situ de *L. anceps*. Su aplicación puede contribuir a producir plantas sin depender de la extracción de ejemplares silvestres, disminuir la presión sobre las poblaciones naturales y apoyar programas de conservación. Asimismo, el desarrollo de protocolos eficientes puede favorecer esquemas legales de producción en viveros, unidades de manejo y comunidades donde se distribuye la especie, vinculando la conservación de las orquídeas con alternativas de aprovechamiento sustentable para la población local.

Literatura citada

Aguilar-Morales, M. A., & López-Escamilla, A. L. (2013). Germinación *in vitro* de *Laelia speciosa* (Kunth) Schltr., una herramienta para su conservación ex situ. En G. Pulido F. y S. Monks (Eds.), Estudios Científicos en el Estado de Hidalgo y Zonas Aledañas (Vol. II, pp. 18-24). Lincoln, NE: Zea Books, University of Nebraska.

Arditti, J., & Ghani, A. K. A. (2000). Numerical and physical properties of orchid seeds and their biological implications. New Phytologist, 145(3), 367-421. https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00587.x

Ávila-Díaz, I., Oyama, K., Gómez-Alonso, C., & Salgado-Garciglia, R. (2009). *In vitro* propagation of the endangered orchid *Laelia speciosa*. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 99(3), 335-343. https://doi.org/10.1007/s11240-009-9609-8

Brooks, M. E., Kristensen, K., van Benthem, K. J., Magnusson, A., Berg, C. W., Nielsen, A., Skaug, H. J., Mächler, M., & Bolker, B. M. (2017). glmmTMB balances speed and flexibility among packages for zero-inflated generalized linear mixed modeling. The R Journal, 9(2), 378–400. https://doi.org/10.32614/RJ-2017-066

CITES. (2025). Apéndices I, II y III: válidos desde el 7 de febrero de 2025. Ginebra, Suiza: Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres. Disponible en: https://cites.org/

Courtis, A. (2014). Guía de Estudio: Crecimiento y Desarrollo (Revisión de M. A. Marassi). Corrientes, Argentina: Cátedra de Fisiología Vegetal, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, Universidad Nacional del Nordeste (UNNE).

Cruz-Higareda, J. B., Luna-Rosales, B. S., & Barba-Álvarez, A. (2015). A novel seed baiting technique for the epiphytic orchid Rhynchostele cervantesii, a means to acquire mycorrhizal fungi from protocorms. Lankesteriana, 15(1), 67-76. https://doi.org/10.15517/lank.v15i1.18525

Damon, A., Aguilar-Guerrero, E., Rivera, L., & Nikolaeva, V. (2014). Germinación *in vitro* de semillas inmaduras de tres especies de orquídeas de la región del Soconusco, Chiapas, México. Revista Chapingo Serie Horticultura, 10(2), 195-203.

DOF (2019). Modificación del Anexo Normativo III, lista de especies en riesgo de la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, protección ambiental-Especies nativas de México de la flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.

Emeterio-Lara, A., García-Franco, J. G., Hernández-Apolinar, M., Mora-Herrera, M. E., Toledo-Hernández, V. H., Valencia-Díaz, S., & Flores-Palacios, A. (2018). Endogamy costs and reproductive biology of *Laelia autumnalis*, an endemic orchid of Mexico. Plant Ecology, 219(12), 1423-1434. https://doi.org/10.1007/s11258-018-0891-6

Emeterio-Lara, A., Palma-Linares, V., Vázquez-García, L. M., & Mejía-Carranza, J. (2016). Usos y comercialización de orquídeas silvestres en la región sur del Estado de México. Polibotánica, 42, 197-214. https://doi.org/10.18387/polibotanica.42.10

Flores-Escobar, G., Legaria, S. J. P., Gil, V. I., & Colinas, L. M. T. (2008). Propagación *in vitro* de Oncidium stramineum Lindl. Una orquídea amenazada y endémica de México. Revista Chapingo Serie Horticultura, 14(3), 347-353.

Flores-Palacios, A., & Valencia-Díaz, S. (2007). Local ilegal trade reveals unknown diversity and involves a high species richness of wild vascular epiphytes. Biological Conservation, 136(3), 372-387. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.11.026

Gallo, F. R., Souza, L. A., Milaneze-Gutierre, M. A., & Almeida, O. J. G. (2016). Seed structure and *in vitro* seedling development of certain Laeliinae species (Orchidaceae). Revista Mexicana de Biodiversidad, 87(1), 68–73. https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.01.005

h R (2nd ed.). CRC Press.

Hágsater, E., Soto-Arenas, M. A., Salazar-Chávez, G. A., Jiménez-Machorro, R., López-Rosas, M. A., & Dressler, R. L. (2005). Las Orquídeas de México. Ciudad de México: Instituto Chinoín, A. C.

Harrell, F. E., Jr. (2015). Regression modeling strategies: With applications to linear models, logistic and ordinal regression, and survival analysis (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19425-7

Harrison, X. A. (2015). A comparison of observation-level random effect and beta-binomial models for modelling overdispersion in binomial data in ecology & evolution. PeerJ, 3, e1114. https://doi.org/10.7717/peerj.1114

Hernández-Muñoz, S., Pedraza-Santos, M. E., Morales-García, J. L., Guillén-Andrade, H., López, P. A., & Téllez-Velasco, M. A. A. (2013). Phenotypic characterization of Mexican orchid *Laelia autumnalis*. Acta Horticulturae, 977, 245-252. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.977.28

Hernández-Ramírez, F., Iracheta-Donjuan, L., Damon, A. A., Fernández-Pavía, S. P., & Guillén-Navarro, K. (2023). Efecto del medio de cultivo y escotoperiodo en la germinación de semillas y crecimiento *in vitro* de Guarianthe skinneri (Bateman) Dressler & W.E. Higgins (Orchidaceae). Polibotánica, 56, 151-170. https://doi.org/10.18387/polibotanica.56.8

Huh, Y. S., Lee, J. K., Nam, S. Y., Suh, G. U., & Paek, K. Y. (2016). Improvement of asymbiotic seed germination and seedling development of Cypripedium macranthos Sw. with organic additives. Journal of Plant Biotechnology, 43(1), 138–145. https://doi.org/10.5010/JPB.2016.43.1.138

Mayo-Mosqueda, A., Maceda-López, L. F., Andrade-Canto, S. B., Noguera-Savelli, E., Caamal-Velázquez, H., Cano-Sosa, J. del S., & Alatorre-Cobos, F. (2020). Efficient

protocol for *in vitro* propagation of *Laelia rubescens* Lindl. from asymbiotic seed germination. South African Journal of Botany, 133, 264–272. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.07.030

Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. Physiologia Plantarum, 15(3), 473-497. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x

Ramírez, M., Niño, S., & Berrío, T. (2016). Anatomía de la raíz de Encyclia cordigera (Kunth) Dressler (Orchidaceae). Revista Unellez de Ciencia y Tecnología, 34, 58-61.

Rasmussen, H. N., Dixon, K. W., Jersáková, J., & Těšitelová, T. (2015). Germination and seedling establishment in orchids: A complex of requirements. Annals of Botany, 116(3), 391-402. https://doi.org/10.1093/aob/mcv087

SEMARNAT. (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Ciudad de México: Diario Oficial de la Federación.

Siddiqui, H., Sami, F., & Hayat, S. (2020). Glucose: Sweet or bitter effects in plants-a review on current and future perspective. Carbohydrate Research, 487, 107884. https://doi.org/10.1016/j.carres.2019.107884

Teixeira da Silva *et al.* (2022). Advances in Breeding, Bioprospecting, and *In vitro* Culture of *Laelia* Orchid Species. Horticulturae, 8(2), 103.

Venables, W. N., & Ripley, B. D. (2002). Modern applied statistics with S (4th ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-21706-2

Vera-Aguilar, A., Ramírez-Mosqueda, M. A., Lee-Espinosa, H. E., Llarena-Hernández, R. C., Rodríguez-Deméneghi, M. V., & Murguía-González, J. (2022). Efficient protocol for *in vitro* propagation of *Laelia anceps* ssp. *anceps* white variant from asymbiotic seed germination. South African Journal of Botany, 149, 376–380. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.06.013

Wood, S. N. (2017). Generalized additive models: An introduction wit

Yeung, E. C. (2017). A perspective on orchid seed and protocorm development. Botanical Studies, 58(1), 1-14. https://doi.org/10.1186/s40529-017-0188-4

Efecto de la dosis de silicio en el cultivo *in vitro* de aguacate 'Duke7'

Alma Delia Abarca Cervantes[80], Fernando Carlos Gómez Merino[81], Libia Iris Trejo Téllez[82], Gregorio Arellano Ostoa[83]

Resumen

La clonación *in vitro* de aguacate (*Persea americana* Mill.) permite reducir los tiempos de propagación, aunque enfrenta problemas de contaminación y necrosis. El silicio (Si) es un elemento benéfico que puede actuar como bioestimulante inorgánico y activar mecanismos de defensa en varios cultivos. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto del Si para el establecimiento *in vitro* de aguacate cv. 'Duke 7'. Se implementó un experimento completamente al azar con dosis de Si al medio de cultivo (0.0, 0.4, 0.8, 1.2 y 1.6 mM), con 20 repeticiones. Se utilizó solución Steiner al 10 % como medio basal con 1 mg benciladenina L^{-1}, 0.05 mg ácido 1-naftalenoacético L^{-1}, 15 g sacarosa L^{-1}, 5 g agar L^{-1} y vitaminas a pH 5.7. Explantes de aguacate 'Duke 7' se establecieron en condiciones asépticas en tubos de ensayo, sembrando un explante con dos yemas en cada tubo. El material se incubó a 25-30 °C con 16 h luz y 8 h oscuridad durante 20 d. La dosis de 0.8 y 1.2 mM de Si mejoraron en 5 y 10 % la sobrevivencia e incrementaron en 20 y 30 % la oxidación, respectivamente, en comparación con el testigo, aunque las diferencias no fueron significativas. Por tanto, la incorporación de Si al medio de cultivo no afecta sobrevivencia, oxidación o incidencia microbiana en el establecimiento *in vitro* de aguacate 'Duke7'.

Palabras clave: Silicio, cultivo *in vitro*, aguacate.

Abstract

In vitro cloning of avocado (*Persea americana* Mill.) allows for reduced propagation times, although it faces challenges regarding contamination and necrosis. Silicon (Si) is a beneficial element that can act as an inorganic biostimulant and activate defense mechanisms in various

80 Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Posgrado de PREGEP-Fisiología Vegetal. Carretera México-Texcoco Km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. Correo: abarca.alma@colpos.mx
81 Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Posgrado de PREGEP-Fisiología Vegetal. Carretera México-Texcoco Km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. Correo de autor de correspondencia: fernandg@colpos.mx
82 Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Posgrado de Edafología. Carretera México-Texcoco Km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. Correo: tlibia@colpos.mx
8383 Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Posgrado de Fruticultura. Carretera México-Texcoco Km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. Correo: arellano@colpos.mx

crops. The objective of this study was to evaluate the effect of Si on the *in vitro* establishment of avocado cv. "Duke 7". A completely randomized experiment was conducted using Si doses in the culture medium (0.0, 0.4, 0.8, 1.2, and 1.6 mM) with 20 replicates. A 10 % Steiner solution served as the basal medium, supplemented with 1 mg L^{-1} benzyladenine, 0.05 mg L^{-1} 1-naphthaleneacetic acid, 15 g L^{-1} sucrose, 5 g L^{-1} agar, and vitamins, at pH 5.7. 'Duke 7' avocado explants were established under aseptic conditions in test tubes, with one explant containing two buds placed in each tube. The material was incubated at 25–30 °C with a 16-h light/8-h dark photoperiod for 20 days. Si doses of 0.8 and 1.2 mM improved survival by 5% and 10% and increased oxidation by 20% and 30%, respectively, compared to the control, although the differences were not statistically significant. Therefore, the incorporation of Si into the culture medium does not affect survival, oxidation, or microbial incidence during the *in vitro* establishment of 'Duke 7' avocado.

Keywords: Silicon, *in vitro* culture, avocado

Introducción

México es el principal productor de aguacate (*Persea americana* Mill.) a nivel mundial, lugar que ha ocupado desde hace más de 20 años debido a que es el país con mayor superficie cosecha (Barrientos *et al*., 2019), pero su rendimiento promedio anual de 2024 fue 10.8 Mg ha^{-1}, lo que lo sitúa en el cuarto lugar a nivel mundial (FIRA, 2024). Por lo que resulta importante encontrar estrategias que ayuden a los productores a mejorar la productividad.

El uso de portainjertos en aguacate es clave para dar uniformidad productiva a los huertos y para dar capacidad de adaptación y resistencia a diversas condiciones de estrés biótico y abiótico (Alberti *et al*., 2017), como resistencia a *Phytophthora cinnamomi* para el caso del cv. 'Duke 7', o tolerancia a salinidad en el cv. 'Velvick' (Barrientos *et al*., 2019). Sin embargo, el aguacate es una especie de difícil enraizamiento, por lo que, formación de raíces adventicias para su clonación requiere métodos específicos para la especie y el portainjerto de interés, como lo es el cultivo *in vitro*, que representa una alternativa a metodología de clonación que requieren un proceso de etiolación, lo que podría reducir el tiempo para obtener una plana clonal (Alberti *et al*., 2017; Hiti-Bandaralage *et al*., 2017).

La propagación *in vitro* de aguacate aún implica diversos retos, como lo es el éxito en el establecimiento, así como problemas de contaminación y oxidación (Hiti-Bandaralage *et al.*, 2017). Como elemento benéfico, el Si ha mostrado efectos bioestimulantes en diversos cultivos para enfrentar condiciones de estrés biótico y abiótico (Costkun *et al*., 2019; Tripathi *et al*., 2021), por lo que este puede ser una alternativa para mitigar problemas de oxidación y

contaminación en condiciones *in vitro*. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del Si en el establecimiento *in vitro* de aguacate cv. 'Duke 7', y la reducción de contaminación y oxidación.

Materiales y métodos

Manejo del material vegetal

A partir de plantas madre de aguacate cv. 'Duke 7' en macetas de 50 L en San Miguel, Tlaixpan, Texcoco, Estado de México (19.511º N, -98.814º O) (Figura 1A), se obtuvieron brotes de 20 cm de longitud aproximadamente. Los brotes colectados se trasladaron en bolsas plásticas y en hielera al laboratorio.

Sitio experimental

La desinfestación y establecimiento *in vitro* de explantes se realizó en el Laboratorio de Biotecnología de Frutales en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, ubicado en Montecillo, Texcoco, Estado de México (19.461º N, -98.910º O).

Medio de cultivo

Se utilizó como medio basal solución Steiner al 10 % (Steiner, 1961) preparada a base de soluciones de Stock, que incluyeron: nitratos, sulfatos, fosfatos, 37.3 mg NaFeEDTA L^{-1}, 0.1 g mio-inositol L^{-1}, 0.5 mg piridoxina L^{-1}, 1 mg ácido nicotínico L^{-1}, 0.1 mg tiamina L^{-1}, 50 mg 6-bencilaminopurina (BA) L^{-1}, 0.05 mg ácido 1-naftalenacético (ANA) L^{-1}, 20 g sacarosa L^{-1}, 4 g agar L^{-1}. Se ajustó pH a 5.7 con 0.1 M HCl y 0.1 M KOH. Los reactivos fueron grado analítico, fabricados por Sigma-Aldrich® (Darmstadt, Alemania).

Se agregó 5 mL de medio de cultivo por tubo de ensayo de 20 x 15 mm, luego, se esterilizó en autoclave por 20 minutos a 120 °C y 2.5 atm de presión.

Desinfestación y establecimiento de cultivo aséptico

En laboratorio, el material vegetal fue seccionado a miniestacas con dos yemas (Figura 1B). Las yemas se mantuvieron en enjuague con agua corriente por 30 min. Posteriormente, en campana de flujo laminar, el material vegetal fue tratado por inmersión en una mezcla de fungicidas 0.5 g Benomilo L^{-1}, 1 g Manzeb® 80WP L^{-1} y 1 g Captán 50WP L^{-1}) por 20 min; en bactericida (4 mL Kasumin® L^{-1} + 1.2 g Fungimycin® 100 L^{-1}) por 15 min y en etanol al 70 % por 30 s, entre etapas y al final se hizo un enjuague con agua destilada estéril por 2 min (Figura 1C). Se sembró un explante con dos yemas por tubo con medio de cultivo, según su tratamiento. El material sembrado se incubó en un en un cuarto de crecimiento a 25-30 °C con 16 h luz y 8 h oscuridad durante 20 d.



Figura 1. Material vegetal y desinfestación de explantes de aguacate (*Persea americana* Mill.) cv. 'Duke 7'. A: Planta madre en invernadero. B: Varetas seccionadas previo a la desinfestación. C: Proceso de inmersión de explantes en etanol al 70 %.

Tratamientos y diseño experimental

Se utilizó un experimento completamente al azar con dosis crecientes de Si: 0, 0.4, 0.8, 1.2 y 1.6 mM incorporadas al medio de cultivo. La fuente de Si fue metasilicato de sodio (Na_2SiO_3) (Sigma-Aldrich®; Darmstadt, Alemania). La unidad experimental fue un tubo con medio de cultivo y un explante. Se utilizaron 20 repeticiones por tratamiento, haciendo un total de 100 unidades experimentales.

Variables medidas

Se evaluó la incidencia, presencia o ausencia, de hongo, bacteria, sobrevivencia, oxidación y necrosis. Y también, la cinética de la oxidación de los explantes.

Análisis estadístico

Se evaluaron como variables binomiales y porcentuales (por tratamiento y respecto a n=20). Se realizó un análisis de datos mediante un modelo lineal generalizado con distribución binomial y función de enlace logit (regresión logística), usando R (versión 4.6.1). La significancia de la dosis de Si se evaluó con la prueba de razón de verosimilitud (chi-cuadrado), también se utilizó el método descriptivo de Kaplan-Meier y la prueba log-rank (Mantel-Cox) global para comparar la cinética de oxidación entre dosis de Si con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$ en todos los casos. El error estándar binomial se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$EE = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \quad ; \qquad p = \frac{x}{n}$$

Donde:
EE = error estándar binomial.
p = probabilidad estimada de éxito.
n = número total de repeticiones.
x = número de éxitos, eventos

Resultados y discusión

Los porcentajes de contaminación mostraron una aparente reducción de 10 a 20 % en la incidencia de bacteria con todas las dosis de Si respecto al testigo. La aparición de hongo aumentó de 5 a 20 % con suministro de Si respecto al testigo. En cuando al porcentaje de sobrevivencia, tanto la dosis más elevada como la más baja redujeron la sobrevivencia en 5 %, aunque 0.8 y 1.2 mM Si la incrementaron en 10 y 5 %, respectivamente, en relación al testigo. Sin embargo, se observa un traslape en las barras de error estándar, lo que visualmente indica la ausencia de un efecto real de la dosis de Si en las tres variables mencionadas, (Figura 2). No hubo presencia de necrosis en los explantes a las 20 d de la evaluación.

En cuanto a la cinética de la oxidación de explantes, se observa que en todas las dosis de Si y en el testigo, la oxidación apareció a los 6 d del establecimiento. Aunque el testigo a los 20 d presentó la menor oxidación, hasta los 10 d las dosis de Si retrasaron la oxidación, excepto la dosis más baja de Si (0.4 mM). Después, presentaron un incremento abrupto hasta los 14 d, y se estabilizó el porcentaje de oxidación hasta los 16 d, posteriormente se mantuvo sin cambios hasta concluir el experimento. La dosis 1.2 mM Si registró el porcentaje más elevado de oxidación, 30 y 10 % más respecto al testigo y a 0.8 mM Si. Además, a la cinética de oxidación, se observa un patrón consistente de los 6 a los 10 d, donde 0.8 mM Si presentó la

menor oxidación, pero a partir de los 10 d tuvo un incremento abrupto en la oxidación, mientras que 0.4 mM Si, de ser la dosis con mayor oxidación en los primeros días, después de 10 d tuvo el menor incremento en la oxidación, siendo la dosis que menos oxidación presentó. Todo ello sugiere un posible patrón en la velocidad de oxidación de acuerdo a la dosis de Si. Sin embargo, como en la figura anterior, las barras de error estándar se traslapan en la mayoría de los tratamientos y a lo largo del tiempo, excepto entre 1.2 mM Si y el testigo, donde aparentemente el traslape es menor y nulo a partir de los 14 d y hasta los 20 d (Figura 3).

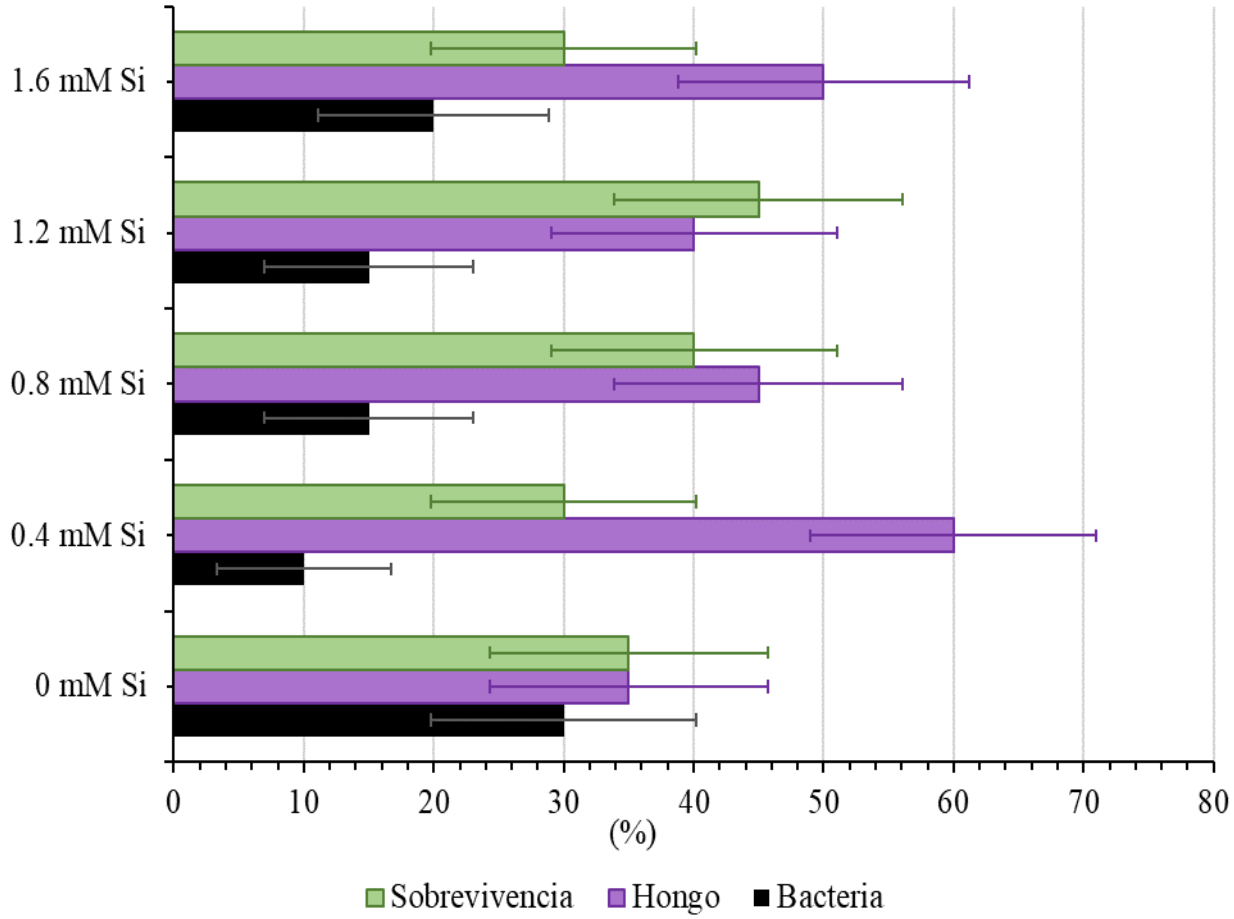


Figura 2. Porcentaje de contaminación y sobrevivencia de explantes de aguacate (*Persea americana* Mill.) cv. 'Duke 7' a los 20 d. Las barras horizontales representan ± error estándar (EE) binomial (n=20 por tratamiento).

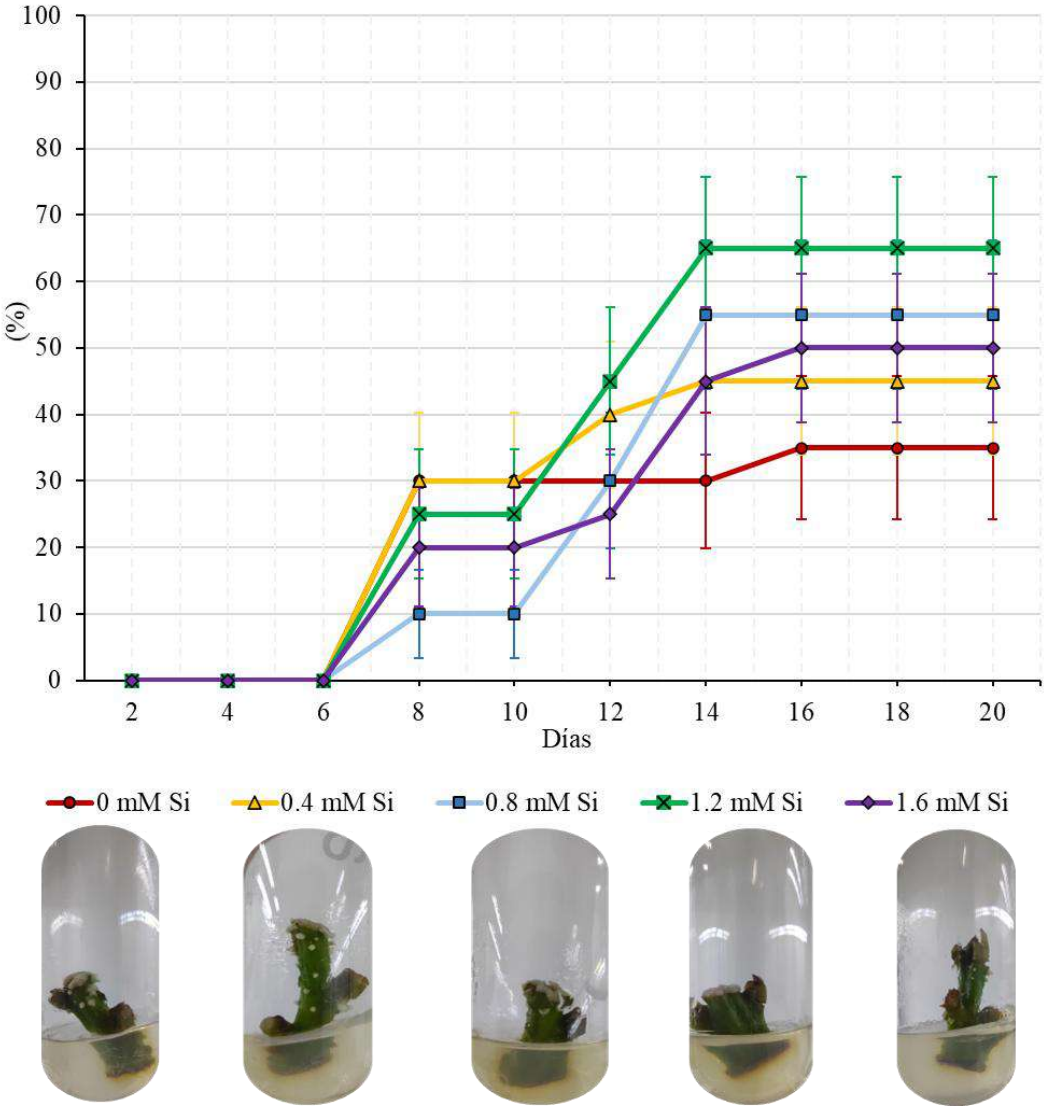


Figura 3. Cinética de la oxidación de explantes de aguacate (*Persea americana* Mill.) cv. ˈDuke 7ˈ a los 20 d. Las barras verticales representan ± error estándar (EE) binomial (n=20 por tratamiento).

Aunque la regresión logística binomial mostró tendencias similares a los resultados en porcentaje, donde se observa que la dosis de 1.2 mM Si respecto al testigo tiene 51.9 % de mayor posibilidad de sobrevivencia y 3.449 veces más de probabilidad de que

los explantes se oxiden, no existen diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos probados (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Regresión logística binomial de las variables evaluadas.

Variable	Dosis	OR 95 % (IC)	*p*-value
Bacteria	0 mM Si	Cte.	0.083
	0.4 mM Si	0.259 (0.034-1.324)	0.13
	0.8 mM Si	0.412 (0.076-1.861)	0.264
	1.2 mM Si	0.412 (0.076-1.861)	0.264
	1.6 mM Si	0.583 (0.126-2.464)	0.468
Hongo	0 mM Si	Cte.	0.187
	0.4 mM Si	2.786 (0.791-10.521)	0.117
	0.8 mM Si	1.519 (0.427-5.583)	0.519
	1.2 mM Si	1.238 (0.342-4.564)	0.744
	1.6 mM Si	1.857 (0.527-6.842)	0.339
Sobrevivencia	0 mM Si	Cte.	0.187
	0.4 mM Si	0.796 (0.205-3.014)	0.736
	0.8 mM Si	1.238 (0.342-4.564)	0.744
	1.2 mM Si	1.519 (0.427-5.583)	0.519
	1.6 mM Si	0.796 (0.205-3.014)	0.736
Oxidación	0 mM Si	Cte.	0.187
	0.4 mM Si	1.519 (0.427-5.583)	0.52
	0.8 mM Si	2.27 (0.647-8.437)	0.207
	1.2 mM Si	3.449 (0.97-13.357)	0.062
	1.6 mM Si	1.857 (0.527-6.842)	0.339

OR: odd ratio; 95 % IC: intervalo de confianza del 95 %; *p*-value: valor de significancia estadística Pr(>|z|); *: p≤0.05 indican diferencias significativas; Cte.: constante, tratamiento de comparación.

Los resultados de las curvas de Kaplan-Meier muestran una tendencia donde la curva de 1.2 mM Si es inferior al resto de curvas, y a partir de los 14 d, junto a 0.8 mM Si presentan más

del 50 % de oxidación, mientras que el testigo tiene el mejor desempeño aparente al registrar la menor oxidación. Sin embargo, el área sombreada de las curvas tiene un traslape la mayoría del tiempo, y el resultado de log-rank global (p=0.55) no detectó diferencias estadísticamente significativas entre curvas. Es decir que, aunque se visualiza una diferencia entre el testigo y 1.2 mM Si, no hay evidencia estadística que lo respalde (Figura 4).

La aplicación de Si puede mitigar el efecto detrimental de diferentes tipos de estrés (Coskun *et al*., 2019), y en cultivo *in vitro* funciona como un agente antimicrobiano mejorando la sobrevivencia (Khattab *et al.*, 2022). No obstante, en el presente trabajo no se encontraron evidencias estadísticamente significativas entre tratamientos aplicados de Si, en las variables evaluadas. Esto puede deberse a la forma de aplicación que podría cambiar el mecanismo de acción, pues en solución es mayor el acceso nutrimental que en medio de cultivo (Chapman *et al*., 2012), dificultando o retrasando su movilidad respecto a la incidencia microbiana.

En nuestros resultados se observó que a mayor dosis de Si, mayor oxidación, lo cual es contrario a lo reportado en la literatura sobre el efecto de Si en la reducción de estrés oxidativo, por su participación en la estimulación positiva de los sistemas antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos (Tripathi, *et al*., 2021; Xiao *et al.*, 2022). La ausencia de diferencias estadística entre tratamientos de Si aplicados pudieran ser atribuidos al tamaño de la muestra o manejo del cultivo, que pudieron intervenir durante el proceso de establecimiento, más que por un efecto directo de Si.

A pesar de que no se encontró evidencia estadística significativa sobre la superioridad de una dosis de Si sobre otra o respecto al testigo, se recomienda la dosis de 0.8 mM Si, que representa un mejor balance entre sobrevivencia y oxidación, debido a que la dosis de 1.2 mM Si podría mejorar la sobrevivencia, pero incrementaría la oxidación.

También se recomienda evaluar la oxidación a los 30 d e incrementar el número de repeticiones para determinar si realmente existe un efecto de la dosis de Si en dicha variable para aguacate cv. 'Duke 7'.

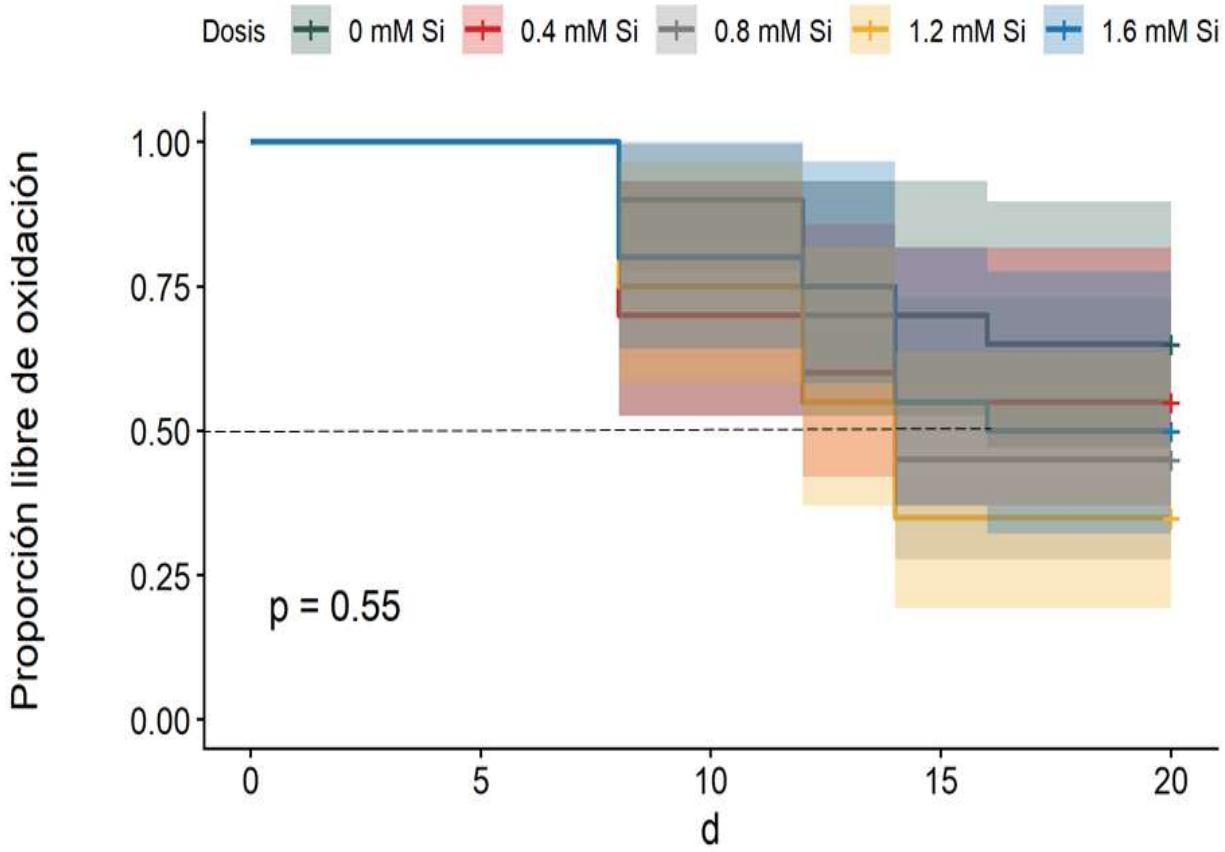


Figura 4. Curvas de Kaplan-Meier con curvas de la proporción de explantes de 'Duke 7' libres de oxidación por dosis de Si a los 20 d. No se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre las curvas mediante la prueba de log-rank (Mantel-Cox) (χ^2 = 3.1; g.l. = 4; p = 0.55). Las bandas sombreadas representan el intervalo de confianza del 95% para cada curva.

Conclusión

Los resultados obtenidos indican que la incorporación de Si al medio de cultivo no tiene efectos significativos en variables de sobrevivencia, oxidación o incidencia de hongos y bacterias en el establecimiento *in vitro* del portainjerto de aguacate ˈDuke7ˈ.

Literatura Citada

Revistas

Alberti, F., Do Amaral, B., Rodrigues, D., Cantuarias-Avilés, T. & Fassio, C. (2017). Avances en la propagación del aguacate. *Revista Brasileira de Fruticultura*. 40 (6): e-782. http://dx.doi.org /10.1590/0100-29452018782

Chapman, N., Miller, A.J., Lindsey, K. & Whalley, W.R. (2012). Roots, water, and nutrient acquisition: let's get physical. *Trends in Plant Science.* 17: 701–710. DOI: 10.1016/j.tplants.2012.08.001

Coskun, D., Deshmukh, R., Sonah, H., Menzies, G., J., Reynolds, O., Ma, J., F., Kronzucker, H., J. & Bélanger, R., R. (2019). The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytologist.* 221(1): 67-85. https://doi.org/10.1111/nph.15343

Hiti-Bandaralage, C. A., Hayward, A. & N. Mitter. (2017). Micropropagation of Avocado (*Persea americana* Mill.). *American Journal of Plant Sciences.* 8 (11): 2898-2921. https://doi.org/10.4236/ajps.2017.811197

Khattab, S., El Sherif, F., AlDayel, M. *et al*. (2022). Silicon dioxide and silver nanoparticles elicit antimicrobial secondary metabolites while enhancing growth and multiplication of *Lavandula officinalis* in-vitro plantlets. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 149: 411–421. https://doi.org/10.1007/s11240-021-02224-x

Steiner, A., A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant Soil*. 15:134–154. https://doi.org/10.1007/BF01347224

Tripathi, D., K., Rai, P., Guerriero, G., Sharma, S., Corpas, F., J. & Singh, V., P. (2021). Silicon induces adventitious root formation in rice under arsenate stress with involvement of nitric oxide and indole-3-acetic acid. *Journal of Experimental Botany.* 72(12): 4457-4471. https://doi.org/10.1093/jxb/eraa488

Xiao, J., Li, Y. & Jeong, B., R. (2022). Foliar Silicon Spray before Summer Cutting Propagation Enhances Resistance to Powdery Mildew of Daughter Plants. *International Journal of Molecular Sciences.* 23(7):3803. https://doi.org/10.3390/ijms23073803

Libros

Barrientos, P., A., F., Muñoz, P., R., B., Reyes, A., J., C., Borys, M., W. & Martínez, D., M., T. (2019). Taxonomía, cultivares y portainjertos. *In*: Téliz D, Mora A, (*eds.*). El aguacate y su manejo integrado. México. Biblioteca Básica de agricultura. pp. 321.

Referencia electrónica

FIRA, 2024, "Panorama agroalimentario. Aguacate", Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, Ciudad de México, México, disponible en: https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=123406 [Fecha de acceso: 7 de agosto de 2026]

Metagenómica de la rizósfera identifica comunidades bacterianas asociadas con la productividad de suelos agrícolas en maíz (*Zea mays* L.)

Sebastián Cano-Serrano[84], José Juan Cano-Serrano, Gustavo Santoyo[85], Ma. del Carmen Orozco-Mosqueda

Resumen

La microbiota del suelo desempeña un papel fundamental en la productividad agrícola y la sostenibilidad de los sistemas de cultivo; sin embargo, aún se conoce poco sobre los cambios que experimentan las comunidades bacterianas de la rizósfera en suelos con diferente productividad. El objetivo de este estudio fue comparar la diversidad, composición e interacciones de las comunidades procarióticas presentes en el suelo a granel y la rizósfera de plantas de maíz (*Zea mays* L.) establecidas en dos suelos arcillosos con productividad contrastante. Se recolectaron muestras de suelo y rizósfera en condiciones de campo, se extrajo ADN metagenómico y se secuenció la región V3–V4 del gen 16S rRNA mediante la plataforma Illumina MiSeq. El análisis bioinformático se realizó utilizando DADA2, la base de datos SILVA v138.2 y herramientas de análisis ecológico para evaluar la diversidad microbiana, la abundancia diferencial y las redes de coocurrencia. Los resultados mostraron que la diversidad alfa fue similar entre ambos suelos; sin embargo, la composición taxonómica y las interacciones microbianas difirieron significativamente entre los sitios. El suelo productivo presentó un enriquecimiento de géneros potencialmente promotores del crecimiento vegetal, entre ellos *Neobacillus*, *Priestia* y *Flavisolibacter*, además de una red de coocurrencia más compleja que la observada en el suelo no productivo. Se concluye que la productividad del suelo está asociada principalmente con cambios en microorganismos específicos y en sus patrones de interacción, más que con variaciones en la diversidad global, proporcionando información valiosa para la identificación de microorganismos con potencial aplicación en el desarrollo de bioinoculantes y estrategias de manejo sostenible del cultivo de maíz.

84 Departamento de Ingeniería Bioquímica y Ambiental, Tecnológico Nacional de México en Celaya, Celaya, Guanajuato 38010, México. Sebastiancano211295@gmail.com, gustavo.santoyo@umich.mx, carmen.orozco@itcelaya.edu.mx, m2603013@itcelaya.edu.mx
85 Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán 58030, México

Palabras clave: microbiota del suelo; rizósfera; secuenciación 16S rRNA; productividad agrícola; PGPR.

Abstract

Soil microbiota plays a fundamental role in agricultural productivity and the sustainability of cropping systems; however, the responses of rhizospheric bacterial communities tocontrasting soil productivity levels remain poorly understood. This study aimed to compare the diversity, composition, and interactions of prokaryotic communities inhabiting bulk soil and the rhizosphere of maize (*Zea mays* L.) grown in two clay soils with contrasting productivity. Soil and rhizosphere samples were collected under field conditions, metagenomic DNA was extracted, and the V3–V4 region of the 16S rRNA gene was sequenced using the Illumina MiSeq platform. Bioinformatic analyses were performed using the DADA2 pipeline, the SILVA v138.2 database, and ecological analyses to evaluate microbial diversity, differential abundance, and co-occurrence networks. Alpha diversity did not differ significantly between the two soils; however, taxonomic composition and microbial interaction patterns showed clear differences associated with soil productivity. The productive soil exhibited a higher relative abundance of bacterial genera with potential plant growth-promoting activity, including *Neobacillus*, *Priestia*, and *Flavisolibacter*, as well as a more complex co-occurrence network than the non-productive soil. These findings indicate that soil productivity is primarily associated with shifts in specific microbial taxa and their interaction patterns rather than changes in overall microbial diversity. This information provides a valuable basis for identifying microbial candidates for the development of bioinoculants and sustainable management strategies aimed at improving maize production.

Keywords: soil microbiota; rhizosphere; 16S rRNA sequencing; agricultural productivity; PGPR.

Introducción

La productividad agrícola está estrechamente relacionada con las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, siendo la microbiota uno de los componentes más importantes para el mantenimiento de su fertilidad y funcionalidad. En la rizósfera, las interacciones entre las plantas y los microorganismos favorecen procesos esenciales como el ciclado de nutrientes, la fijación biológica de nitrógeno, la solubilización de fósforo, la

producción de fitohormonas y la supresión de fitopatógenos, contribuyendo al crecimiento y desarrollo de los cultivos. Entre estos microorganismos destacan las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), las cuales representan una alternativa sostenible para incrementar la productividad agrícola y reducir la dependencia de agroquímicos.

El desarrollo de tecnologías de secuenciación de nueva generación ha permitido caracterizar la diversidad microbiana mediante enfoques metagenómicos, identificando microorganismos que no pueden cultivarse mediante técnicas microbiológicas convencionales y analizando los cambios en la estructura de las comunidades asociados con diferentes condiciones ambientales y de manejo agrícola. Estas herramientas ofrecen una visión integral de la microbiota del suelo y permiten identificar microorganismos con potencial biotecnológico para el desarrollo de bioinoculantes y estrategias de manejo sustentable.

En México, particularmente en la región del Bajío, el cultivo de maíz (Zea mays L.) constituye una de las principales actividades agrícolas. Sin embargo, existen suelos con características fisicoquímicas similares que presentan diferencias importantes en su productividad, lo que sugiere que la composición y organización de las comunidades microbianas podrían desempeñar un papel determinante en su funcionamiento. Comprender estas diferencias permitirá identificar microorganismos asociados con una mayor productividad y establecer las bases para futuras aplicaciones en agricultura sostenible.

Por ello, el objetivo de este estudio fue comparar, mediante secuenciación metagenómica del gen 16S rRNA, la diversidad, composición e interacciones de las comunidades procarióticas presentes en el suelo a granel y la rizósfera de plantas de maíz establecidas en dos suelos agrícolas con productividad contrastante.

Materiales y métodos

Sitio de estudio y muestreo

El estudio se realizó en dos suelos agrícolas arcillosos ubicados en los municipios de Salamanca y Villagrán, Guanajuato, México, ambos bajo un manejo agronómico similar, pero con niveles contrastantes de productividad. El suelo de Salamanca se clasificó como productivo y el de Villagrán como no productivo con base en los registros históricos de rendimiento de maíz (*Zea mays L.*) y trigo (*Triticum aestivum* L.) durante cinco ciclos agrícolas consecutivos.

Se recolectaron muestras de suelo a granel y rizósfera de plantas de maíz en ambos sitios. Para la rizósfera se seleccionaron cinco plantas por tratamiento y se obtuvieron tres muestras compuestas independientes a partir del suelo adherido a las raíces. Las muestras de suelo a granel se obtuvieron a una profundidad de 10 cm en áreas sin vegetación, integrando tres réplicas compuestas por sitio. Todas las muestras fueron transportadas en condiciones de refrigeración para su procesamiento en laboratorio.

Extracción de ADN y secuenciación metagenómica

El ADN metagenómico se extrajo utilizando el kit DNeasy PowerSoil (QIAGEN, Alemania), siguiendo las recomendaciones del fabricante. Posteriormente, se evaluó la calidad e integridad del ADN mediante espectrofotometría y electroforesis en gel de agarosa. La región hipervariable V3–V4 del gen 16S rRNA fue amplificada y secuenciada mediante la plataforma Illumina MiSeq (2 × 300 pb).

Análisis bioinformático y estadístico

Las secuencias obtenidas fueron procesadas mediante el paquete DADA2 en R para el filtrado de calidad, eliminación de quimeras e inferencia de variantes de secuencia de amplicones (ASVs). La asignación taxonómica se realizó utilizando la base de datos SILVA v138.2. Posteriormente, se efectuaron análisis de diversidad alfa (índices de Shannon y Simpson), diversidad beta mediante análisis de coordenadas principales (PCoA) y PERMANOVA basada en distancias de Bray–Curtis. Asimismo, se evaluó la abundancia diferencial de los principales géneros bacterianos mediante análisis discriminante lineal (LDA) y se construyeron redes de coocurrencia utilizando correlaciones de Spearman para identificar patrones de interacción entre microorganismos asociados con la productividad del suelo.

Resultados y discusión

Los registros históricos de producción confirmaron diferencias significativas entre los dos sitios de estudio durante cinco ciclos agrícolas consecutivos. El suelo productivo presentó un rendimiento promedio de 14,580 kg /ha de maíz, mientras que el suelo no productivo alcanzó 11,410 kg /ha, evidenciando un contraste consistente en la productividad agrícola entre ambos sistemas. Así mismo, ambos suelos compartieron características texturales similares; sin embargo, el suelo productivo mostró mayor contenido de materia orgánica, manganeso y

nitratos, además de un pH más cercano a la neutralidad, condiciones que favorecen el establecimiento y actividad de comunidades microbianas benéficas.

Table 1: Rendimiento anual de maíz (*Zea mays L.*) y trigo (*Triticum aestivum L.*) en suelos agrícolas con productividad contrastante durante cinco ciclos agrícolas (2020–2024). Los valores corresponden al rendimiento (kg ha^{-1}). Los datos se expresan como media ± desviación estándar. Letras diferentes en una misma fila indican diferencias significativas entre suelos productivos y no productivos ($p < 0.05$).

Year	Maize—Productive Soil	Maize—Non-Productive Soil	Wheat—Productive Soil	Wheat—Non-Productive Soil
2020	16,360	13,280	7390	5690
2021	13,160	11,125	7840	6450
2022	14,590	12,135	7670	6590
2023	15,900	10,128	8050	7940
2024	12,890	10,380	7470	6140
Mean annual yield	14,580 ± 1564 a	11,410 ± 1305 b	7684 ± 270 a	6562 ± 844 b

La secuenciación metagenómica del gen 16S rRNA generó 5,612,654 secuencias de alta calidad, permitiendo identificar 30,420 variantes de secuencia de amplicones (ASVs) después del control de calidad y la eliminación de quimeras. La clasificación taxonómica mostró una microbiota dominado por arqueas oxidantes de amonio pertenecientes a *Nitrososphaeraceae,* presentes en ambos suelos, lo que sugiere la conservación de procesos esenciales relacionados con el ciclo del nitrógeno independientemente del nivel de productividad.

Los índices de diversidad alfa no mostraron diferencias significativas entre los suelos evaluados; sin embargo, el análisis de diversidad beta indicó que el tipo de suelo explicó una proporción importante de la variación en la estructura de las comunidades bacterianas, mientras que el efecto del compartimento (suelo a granel o rizósfera) fue menor. Estos resultados indican que la productividad del suelo está más relacionada con cambios en la composición de la microbiota que con modificaciones en su diversidad total.

El análisis de abundancia diferencial reveló un enriquecimiento de géneros bacterianos con potencial promotor del crecimiento vegetal en el suelo productivo, destacando *Neobacillus, Priestia, Flavisolibacter, Sporosarcina y Pseudogracilibacillus,* mientras que géneros como *Aggregicoccus, Haloactinopolyspora y Asanoa* fueron más abundantes en el suelo no

productivo. La presencia diferencial de estos microorganismos sugiere que determinados taxones podrían desempeñar funciones relevantes en la disponibilidad de nutrientes, tolerancia al estrés y promoción del crecimiento vegetal.

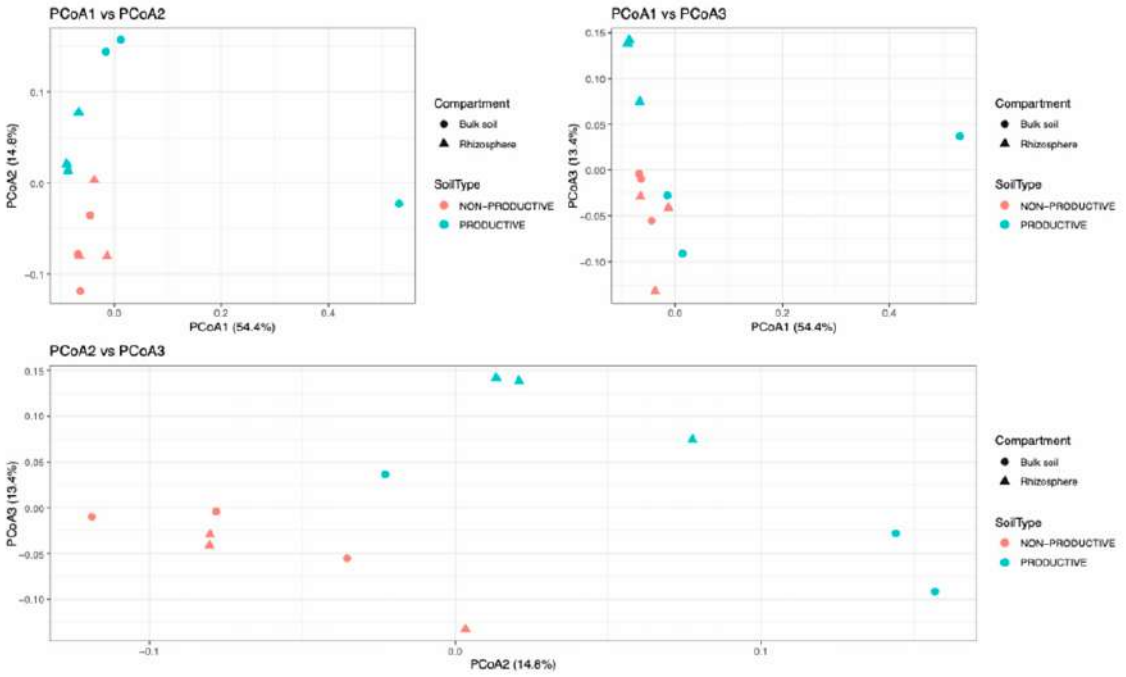


Figura 2. Análisis de coordenadas principales (PCoA) basado en la distancia de Bray–Curtis de las comunidades bacterianas presentes en suelo a granel y rizósfera de maíz (Zea mays L.) establecidas en suelos agrícolas con productividad contrastante. Se muestran las proyecciones entre los tres primeros componentes principales (PCoA1–PCoA2, PCoA1–PCoA3 y PCoA2–PCoA3). Los círculos representan muestras de suelo a granel y los triángulos muestras de rizósfera; el color azul corresponde al suelo productivo y el color rojo al suelo no productivo.

Las redes de coocurrencia mostraron diferencias claras entre ambos sistemas agrícolas. En el suelo productivo se observaron redes con mayor conectividad y asociaciones positivas en las que *Flavisolibacter* ocupó una posición central, mientras que *Pontibacter* presentó principalmente interacciones negativas. En el suelo no productivo destacaron asociaciones positivas entre *Candidatus y Bacillus*, además de relaciones negativas con *Massilia*. Estas

diferencias evidencian que la organización de las comunidades microbianas, además de su composición taxonómica, puede influir en la funcionalidad del suelo y, en consecuencia, en la productividad agrícola.

En conjunto, los resultados demuestran que la metagenómica constituye una herramienta eficaz para identificar microorganismos y patrones de interacción asociados con la productividad del suelo. Más que una mayor diversidad microbiana, los suelos con mayor rendimiento presentaron un enriquecimiento de microorganismos con potencial promotor del crecimiento vegetal y redes microbianas más complejas. Estos hallazgos respaldan la posibilidad de utilizar géneros como *Neobacillus, Priestia y Flavisolibacter* como candidatos para el desarrollo de bioinoculantes y estrategias de manejo microbiológico orientadas a incrementar la productividad y sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

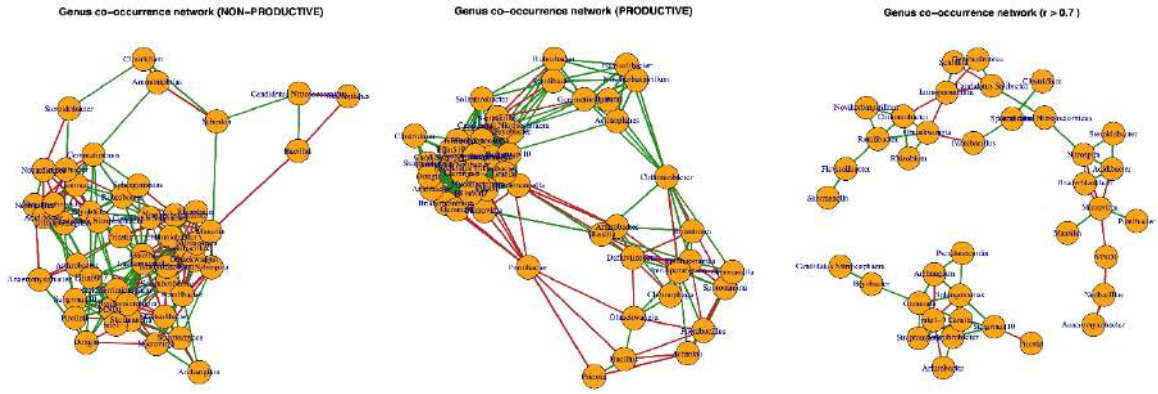


Figura 3. Redes de coocurrencia de los principales géneros bacterianos identificados mediante secuenciación metagenómica del gen 16S rRNA en suelos agrícolas con productividad contrastante cultivados con maíz (*Zea mays* L.). El panel izquierdo corresponde al suelo no productivo, el panel central al suelo productivo y el panel derecho muestra las asociaciones con coeficientes de correlación fuertes ($r > 0.7$). Cada nodo representa un género bacteriano y las líneas indican asociaciones significativas entre pares de géneros; las líneas verdes representan correlaciones positivas y las rojas correlaciones negativas, estimadas mediante el coeficiente de correlación de Spearman. Las diferencias en la conectividad y organización de las redes sugieren que la estructura de las

interacciones microbianas varía entre los suelos con distinta productividad, lo que podría influir en la funcionalidad del microbioma y en el desempeño del cultivo.

Conclusiones

La secuenciación metagenómica del gen 16S rRNA permitió caracterizar las comunidades bacterianas presentes en suelos agrícolas con productividad contrastante cultivados con maíz (*Zea mays* L.). Aunque los índices de diversidad alfa no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos, la composición taxonómica y la organización de las comunidades microbianas variaron en función de la productividad del suelo.

Los suelos productivos presentaron un enriquecimiento de géneros bacterianos con potencial promotor del crecimiento vegetal, como *Neobacillus, Priestia y Flavisolibacter*, además de redes de coocurrencia con mayor conectividad, lo que sugiere una mayor complejidad en las interacciones microbianas. Estos resultados indican que la productividad agrícola está asociada principalmente con cambios en la estructura y funcionalidad potencial del microbioma del suelo, más que con un incremento en su diversidad.

En conjunto, este estudio demuestra que la metagenómica constituye una herramienta eficaz para identificar microorganismos candidatos con potencial biotecnológico, proporcionando información valiosa para el desarrollo de bioinoculantes y estrategias de manejo sostenible orientadas a mejorar la productividad de los sistemas agrícolas.

Literatura citada

Bei, S., Wang, Z., Lyu, M., Li, Y., Zhou, Z., Chen, N., *et al.* (2023). Metagenome-assembled genomes reveal the functional potential of agricultural soil microbiomes. *Microbiome, 11*, 173. https://doi.org/10.1186/s40168-023-01592-7

Borlaug, N. E. (2002). *The Green Revolution Revisited and the Road Ahead*. Nobel Prize Outreach AB.

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. *Nature Methods*, *13*(7), 581–583. https://doi.org/10.1038/nmeth.3869

Giller, K. E., Delaune, T., Silva, J. V., Descheemaeker, K., Van de Ven, G., Schut, A. G., & van Ittersum, M. K. (2021). The future of farming: Who will produce our food? *Food Security, 13*, 1073–1099. https://doi.org/10.1007/s12571-021-01184-6

Jiao, X., Takishita, Y., Zhou, G., & Smith, D. L. (2021). Plant-associated rhizobacteria for biocontrol and plant growth enhancement. *Frontiers in Plant Science, 12*, 634796. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634796

Khoso, M. A., Wagan, S., Alam, I., Hussain, A., Ali, Q., Saha, S., & Liu, F. (2024). Impact of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) on plant nutrition and root characteristics: Current perspective. *Plant Stress, 11*, 100341. https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100341

Kruščić, D., *et al.* (2024). Biofertilizers and bacterial inoculants shape soil microbial communities and enrich *Flavisolibacter*. *Applied Soil Ecology*. https://doi.org/

Moturu, T., *et al.* (2024). *Priestia megaterium* and *Priestia aryabhattai* as maize endophytes with plant growth-promoting potential.

Quast, C., Pruesse, E., Yilmaz, P., Gerken, J., Schweer, T., Yarza, P., Peplies, J., & Glöckner, F. O. (2013). The SILVA ribosomal RNA gene database project: Improved data processing and web-based tools. *Nucleic Acids Research, 41*(D1), D590–D596. https://doi.org/10.1093/nar/gks1219

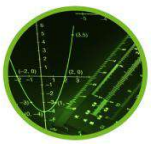
Sharma, V., Sheershwal, A., & Bisht, S. (2025). Rhizobacteria revolution: Amplifying crop resilience and yield. *Journal of Basic Microbiology, 65*, e039. https://doi.org/10.1002/jobm.202400039

Tripathi, A., Pandey, V. K., Jain, D., Singh, G., Brar, N. S., Taufeeq, A., & Rustagi, S. (2024). PGPR-induced plant signalling and stress management. *Journal of Agriculture and Food Research, 16*, 101169. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101169

Wang, Y., Pei, Y., Wang, X., Dai, X., & Zhu, M. (2021). Antimicrobial metabolites from PGPR. *Advances in Agrochemicals, 3*, 206–221.

Yanai, J., Tanaka, S., Nakao, A., Abe, S. S., Hirose, M., Sakamoto, K., & Kyuma, K. (2022). Long-term changes in paddy soil fertility. *European Journal of Soil Science, 73*, e13193. https://doi.org/10.1111/ejss.13193

Áreas Temáticas



Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible



Economía Agrícola, Desarrollo Territorial, Tecnología e Innovación Social



Ciencias Biológicas y Agronómicas



Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global



Desarrollo rural, agroecología y cambio climático

Microbiota apícola: aportes de los estudios *in silico* a la agronomía sostenible

Dailen Guanche Gallardo[86]

Resumen

El objetivo de este trabajo es exponer y argumentar la importancia de los estudios in silico de la microbiota de abejas para el desarrollo sostenible de la agricultura, mostrando cómo la identificación computacional de compuestos y biomarcadores microbianos puede traducirse en intervenciones que protejan servicios de polinización, optimicen prácticas agronómicas y mitiguen riesgos en la producción, distribución y comercialización de alimentos.

Palabras clave: microbiota de abejas; *in silico*; péptidos antimicrobianos; producción alimentaria.

Abstract

This study aims to articulate and substantiate the scientific relevance of *in silico* analyses of the bee microbiota within the broader framework of sustainable agricultural development. Specifically, it examines how the computational identification of microbial compounds and biomarkers can be translated into evidence-based interventions designed to safeguard pollination services, improve agronomic performance, and reduce biological and operational risks throughout the food production, distribution, and commercialization chain.

Key words: bee microbiota; *in silico*; antimicrobial peptides; food production

Introducción

La apicultura o manejo de colmenas, es la práctica agrícola dedicada a la cría y gestión de abejas para obtener productos como la miel, la cera, el propóleos, así como servicios de polinización. Estos últimos son responsables, en buena parte, del incremento del rendimiento y calidad de numerosos cultivos. La apicultura es, por tanto, una actividad integrada en la agronomía moderna y en la seguridad alimentaria global.

[86] Centro de Investigaciones Apícolas, Carretera Cano-Wajay, Km 0, El Cano, Arroyo Arenas, La Lisa, Ciudad Habana, Cuba. Teléfono: (537) 72807897, 72807027 y 72807890
investigadora@ciapi.minag.cu

Dentro de esta, la microbiota de las abejas es el conjunto de bacterias, hongos y otros microorganismos asociados a su intestino (Anderson et al., 2024). Cumple funciones críticas en nutrición, desarrollo inmune y defensa frente a patógenos. Su composición y funcionalidad influyen en la resistencia de las colonias a enfermedades y al estrés ambiental (Motta & Moran, 2024; Hariprasath et al., 2025).

Los estudios *in silico*, por su parte, comprenden herramientas computacionales como metagenómica, predicción de péptidos antimicrobianos, cribado virtual y docking molecular, para modelar interacciones biomoleculares y predecir compuestos bioactivos. Estas técnicas permiten priorizar candidatos (péptidos, metabolitos, BGCs) antes de ensayos experimentales, acelerando descubrimientos y reduciendo costos (Eadie et al., 2026). Aunque existen estudios *in silico* que identifican péptidos antimicrobianos y nodos de genes biosinteticos (biosynthetic gene clusters, BGCs) en la microbiota apícola, la integración explícita de esos hallazgos con modelos agronómicos (rendimiento de cultivos, servicios de polinización, cadenas de suministro) es aún limitada. Investigaciones recientes han descrito BGCs y péptidos candidatos en genomas y metagenomas de simbiontes apícolas (Lang et al., 2023), pero la traducción de esos resultados a estrategias de manejo apícola y a impactos agronómicos permanece fragmentada.

Entre los aportes que se obtendrían al superar esta limitación se encuentran: (1) desarrollo de probióticos o biocontroladores que reduzcan pérdidas de colonias; (2) detección temprana de brotes mediante biomarcadores microbianos; (3) políticas agronómicas que integren salud microbiana de polinizadores para asegurar rendimientos. En teoría, ampliaría la comprensión de la coevolución huésped-microbio-patógeno. En la práctica, tendría el potencial de reducir costos de reposición de colmenas y estabilizar la oferta de cultivos dependientes de polinización. En lo social, mejoraría la seguridad alimentaria y la resiliencia rural.

El objetivo de este trabajo es exponer y argumentar la importancia de los estudios *in silico* de la microbiota de abejas para el desarrollo sostenible de la agricultura, mostrando cómo la identificación computacional de compuestos y biomarcadores microbianos puede traducirse en intervenciones que protejan servicios de polinización, optimicen prácticas agronómicas y mitiguen riesgos en la producción, distribución y comercialización de alimentos. Para ello se revisan metodologías *in silico*, hallazgos recientes y las implicaciones teóricas, prácticas y sociales derivadas de su aplicación.

Materiales y métodos

Fuentes de datos

Se realizó una revisión sistemática estratificada de la bibliografía desde el 2020 hasta el 2026, donde se incluyeron publicaciones científicas, tesis y bases de datos públicas que reportaron análisis *in silico* o datos genómicos/metagenómicos, predicción de AMPs, docking y volatilómica de la microbiota de abejas *Appis mellifera* y *Melipona bechi*. Las búsquedas se realizaron en PubMed, Scopus, Google Scholar, Researchgate y repositorios de tesis universitarias. Se usaron términos combinados relacionados con "honey bee gut microbiota", "metagenome", "biosynthetic gene clusters", "antimicrobial peptides", "molecular docking" y "volatilomics". Esta estrategia sigue recomendaciones metodológicas para estudios de microbiota en abejas (Romero et al., 2019).

Procedimientos

Los artículos encontrados fueron sometidos a un proceso de depuración en el cual se descartaron aquellos que presentaban exclusivamente estudios *in vitro* o *in vivo*. La selección se centró en investigaciones que aportaron datos derivados de enfoques *in silico*, particularmente aquellas que permitieron la identificación de candidatos bioactivos mediante la búsqueda de BGCs, la predicción de péptidos antimicrobianos y el modelado estructural de péptidos o proteínas de interés. Asimismo, se priorizaron los trabajos que realizaron cribado virtual y análisis de docking, evaluando la afinidad entre péptidos o metabolitos microbianos y dianas virulentas asociadas a patógenos apícolas. Finalmente, se incluyeron estudios que desarrollaron un análisis integrador, correlacionando la presencia de BGCs o AMPs con variables agronómicas reportadas, como la incidencia de enfermedades en colmenas y el rendimiento de polinización, siempre que los metadatos disponibles lo permitieron.

Visualizacion de datos

Para representar la correlación entre los distintos tipos de estudios *in silico* y los indicadores agronómicos se elaboró un mapa de calor. La construcción de la matriz se realizó a partir de los valores de asociación inferidos en la revisión bibliográfica, expresados en una escala continua de 0 a 1, donde 0 indica ausencia de correlación y 1 representa correlación máxima.

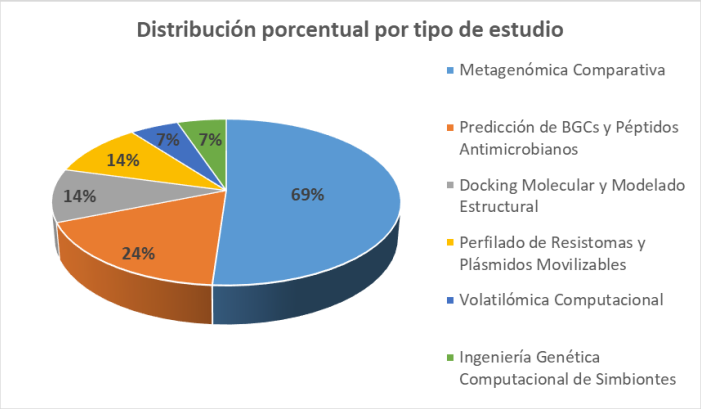
La matriz incluyó como filas los tipos de estudio (*metagenómica comparativa, predicción de BGCs/AMPs, docking/modelado estructural, resistoma/plásmidos, volatilómica, ingeniería genética*) y como columnas los indicadores agronómicos (*eficacia de polinización, mortalidad de colonias, prevalencia de patógenos, diseminación de resistencia, rendimiento de cultivo*).

La escala cromática empleada fue un gradiente de azul a rojo, donde los valores bajos (0–0.3) se representaron en tonos azul claro, los valores intermedios (0.4–0.6) en tonos amarillos/naranjas, y los valores altos (0.7–1.0) en tonos rojos intensos. Esta codificación visual permitió identificar rápidamente las asociaciones más fuertes y las áreas de menor relación.

El mapa se generó con software STATISTICA 8.0.

Resultados y discusión

Se revisaron alrededor de 50 artículos de los cuales se escogieron 29 para su inclusión en el



análisis debido a que sus resultados se relacionaban con los objetivos del estudio. Los años escogidos para el estudio buscaban la obtención de datos novedosos y actualizados.

El análisis de los 29 artículos científicos evidencia que los enfoques *in silico* se han convertido en herramientas fundamentales para comprender la microbiota de las abejas y su relación con la agricultura. Tras la revisión de la literatura, se observó que ciertas técnicas se emplean de manera recurrente en los estudios analizados, mientras que otras aparecen con menor frecuencia (figura 1).

Figura 1. Distribución en porciento de cada enfoque *in silico* encontrado en los artículos.

La metagenómica comparativa es el tipo de estudio más frecuente, presente en aproximadamente el 69% de los artículos (20/29) y se utilizó para caracterizar la composición taxonómica y funcional de microbiotas de reinas, obreras, miel, poblaciones expuestas a cultivos y para reconstruir relaciones filogenéticas entre simbiontes (Prasad et al., 2025;

Almeida et al., 2023; Tran et al., 2025; Galanis et al., 2022; Caesar et al., 2024). Estos estudios permitieron identificar núcleos microbianos conservados (por ejemplo: *Gilliamella*, *Snodgrassella*, *Lactobacillus*), variaciones geográficas y estacionales, y firmas asociadas al forrajeo y a la exposición agrícola (Prasad et al., 2025; Almeida et al., 2023; Galanis et al., 2022).

Seguido se encuentra la predicción de clusters biosintéticos (BGCs) y péptidos antimicrobianos (24%, 7/29) con el empleo de herramientas bioinformáticas para identificar regiones genómicas y metagenómas de simbiontes intestinales responsables de la síntesis de metabolitos secundarios, muchos de ellos con potencial antimicrobiano (Lang et al., 2023; Navarro-Muñoz et al., 2020).

El docking molecular y modelado estructural (14%, 4/29) como evaluación computacional de la afinidad de unión entre metabolitos microbianos y proteínas diana de patógenos apícolas (Cuanalo et al., 2011) y la predicción de la estructura, estabilidad y función de péptidos antimicrobianos derivados de simbiontes intestinales (Luzuriaga et al., 2026).

El perfilado de resistomas y plásmidos movilizables (14%, 4/29) para mapear transferencia horizontal de genes de resistencia (Sun et al., 2022), la volatilómica computacional (7%, 2/29) con análisis multivariante para identificar firmas químicas de microbiota y patógenos, así como el desarrollo de biomarcadores no invasivos para diagnóstico rápido e inferir preferencias de forrajeo (Galanis et al., 2022; Fido et al., 2025) y la ingeniería genética computacional de simbiontes (7%, 2/29) con el diseño computacional de vectores/plásmidos de amplio rango para introducir funciones beneficiosas y la mejora de la resiliencia de colonias (Leonard et al., 2018), son otros tipos de trabajos *in silico* encontrados.

Entre los resultados más relevantes y novedosos destacan la identificación de péptidos antimicrobianos derivados de simbiontes capaces de inhibir *Melissococcus plutonius* (Lang et al., 2023); la detección de fagos Caudoviricetes en el microbioma de reinas, que sugiere control viral de comunidades bacterianas (Caesar et al., 2024); la publicación de recursos metagenómicos de abejas expuestas a cultivos (Tran et al., 2025) que sirven como línea base para evaluar impacto agrícola; la cartografía geográfica del resistoma y la demostración de transferencia mediada por plásmidos movilizables (Sun et al., 2022); y la demostración de que la volatilómica en tiempo real puede discriminar firmas químicas de microbiota y patógenos, proponiendo sensores para monitoreo de colmenas (Fido et al., 2025). Metodológicamente, el desarrollo de marcos computacionales para BGCs (Navarro-Muñoz et al., 2020) y de herramientas para ensamblaje modular de plásmidos (Leonard et al., 2018)

aceleran la transición de predicción a la aplicación. Todos ellos con aplicaciones importantes en la agricultura.

Los estudios encontrados muestran una correlación entre los resultados *in silico* y determinadas variables agronómicas. Un caso de ello es la diversidad y la estabilidad microbiana, donde se asocian con indicadores de vigor de colonia y, por extensión, con la eficacia de polinización y rendimiento de cultivos (Almeida et al., 2023; Prasad et al., 2025; Galanis et al., 2022). Otro caso sería la presencia y distribución del resistoma donde se reflejan prácticas agrícolas y uso de antimicrobianos en el paisaje, con riesgo de diseminación de ARGs entre agroecosistemas (Sun et al., 2022). La metagenómica en la miel permite identificar plantas visitadas y, por tanto, conectar preferencias de forrajeo con disponibilidad floral y servicios de polinización (Galanis et al., 2022). Y la identificación de péptidos antimicrobianos y la ingeniería de simbiontes apuntan a estrategias para reducir pérdidas por enfermedades y mejorar la resiliencia de colmenas, con impacto en la estabilidad de la polinización y la productividad agrícola (Lang et al., 2023; Leonard et al., 2018).

Estos hallazgos vinculan la salud apícola con indicadores agronómicos como rendimiento de cultivos, seguridad alimentaria y sostenibilidad agrícola (tabla 1).

Tabla 1. Relación entre resultados *in silico* e indicadores agronómicos

Resultado *in silico*	Indicador agronómico	Mecanismo de vínculo	Referencias
Metagenómica comparativa (diversidad y funciones)	Eficacia de polinización; rendimiento de cultivo	Microbiota sana → mayor vigor y forrajeo → mejor polinización	Prasad et al., 2025; Almeida et al., 2023; Galanis et al., 2022 Motta et al., 2024
Identificación de péptidos antimicrobianos	Reducción de mortalidad por enfermedades; menor pérdida de colonias	AMPs microbianos → control de patógenos (p. ej. *M. plutonius*)	Lang et al., 2023 Zhang et al., 2022
Perfilado de resistoma y plásmidos	Riesgo de diseminación de resistencia; seguridad alimentaria	Plásmidos movilizables → transferencia de ARGs entre microbiotas del paisaje	Sun et al., 2022

Volatilómica / metagenómica de miel	Diagnóstico temprano; manejo sanitario; seguimiento floral	Detección no invasiva → intervenciones tempranas; identificación de plantas visitadas	Galanis et al., 2022; Fido et al., 2025
Ingeniería de simbiontes (vectores)	Mejora de inmunidad y productividad apícola	Introducción de funciones beneficiosas → mayor resiliencia de colonias	Leonard et al., 2018

Para sintetizar las asociaciones entre tipos de estudio *in silico* e indicadores agronómicos se propone un mapa de calor (valores 0–1 que representan fuerza relativa de asociación inferida) (figura 2). Este, sintetiza cómo cada enfoque computacional puede traducirse en indicadores agronómicos medibles y útiles para la toma de decisiones en manejo agrícola y apícola.

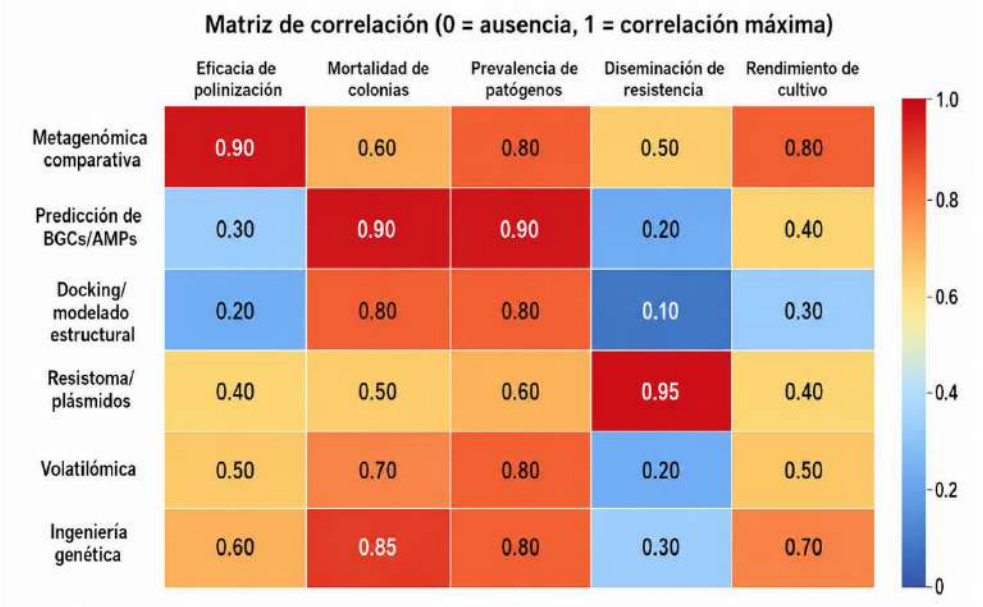


Figura 2. Diagrama de correlación entre tipos de estudio in silico e indicadores agronómicos

¿Qué significado tienen los resultados? Indican que la comunidad microbiana de la colmena no es solo un conjunto pasivo de comensales, sino una fuente funcional de compuestos que

pueden modular la resistencia a enfermedades, ofrecer biomarcadores diagnósticos y servir como base para probióticos o biocontroladores (Anderson et al., 2024; Motta et al., 2024;). En términos teóricos, refuerzan modelos de coevolución huésped-microbiota-patógeno y amplían la comprensión de los mecanismos microbianos de defensa, mientras que en la práctica señalan rutas concretas para desarrollar intervenciones que mejoren la salud de las colonias (Motta et al., 2024;).

La salud apícola está directamente vinculada con los suministros de servicios de polinización que sostienen, tanto el rendimiento, como la calidad de numerosos cultivos. Y este vínculo se encuentra mediado en gran medida por la microbiota intestinal de las abejas. La evidencia disponible muestra que dicha microbiota contribuye a la polinización eficiente al mantener la vitalidad de las colonias, asegurando la capacidad de las abejas para polinizar frutas, hortalizas y cereales, lo que se traduce en mayores rendimientos agrícolas. Además, ejerce un papel clave en la defensa contra patógenos, ya que diversas bacterias intestinales de *Apis mellifera* poseen actividad antimicrobiana frente a patógenos apícolas e incluso algunos humanos, reduciendo la mortalidad y mejorando la estabilidad de las colmenas (Romero et al., 2019; Motta et al., 2024). A ello se suma su influencia en la nutrición y comportamiento, regulando la digestión de polen y néctar y favoreciendo procesos de aprendizaje y orientación que impactan directamente en la eficiencia de la polinización y en la calidad de los productos agrícolas (Braglia et al., 2025).

Las perspectivas que emergen para la agronomía incluyen la incorporación de la salud microbiana de los polinizadores en programas de manejo integrado de cultivos, lo que puede traducirse en prácticas agronómicas que optimicen polinización y rendimiento. Por otro lado, el uso de probióticos apícolas estandarizados y la creación de sistemas de vigilancia basados en biomarcadores volatilómicos para intervenciones tempranas, los cuales reducirían las pérdidas y costos de reposición de colmenas. Y el diseño de modelos integrados que cuantifiquen el impacto económico y productivo de intervenciones microbianas sobre cadenas de suministro alimentario, apoyando decisiones de política agrícola y seguridad alimentaria En conjunto, estos avances revisten gran importancia porque ofrecen herramientas novedosas para proteger y optimizar un servicio ecosistémico crítico, integrando biotecnología microbiana con prácticas agronómicas sostenibles.

Abordando los impactos que pueden traer estos estudios, a mediano plazo (3–7 años), la integración de estos resultados in silico puede permitir la incorporación de protocolos de monitoreo basados en metagenómica y volatilómica para detección temprana de amenazas, el desarrollo de probióticos o tratamientos microbianos dirigidos que reduzcan la mortalidad por enfermedades y mejores prácticas de manejo apícola y agrícola que minimicen la

diseminación de ARGs. A largo plazo (>7 años), se puede esperar la consolidación de apicultura de precisión que optimice la polinización y aumente rendimientos, la adopción de estrategias microbianas preventivas que reduzcan el uso de antibióticos y agroquímicos, y el diseño de paisajes agrícolas que favorezcan microbiotas beneficiosas en polinizadores, mejorando la resiliencia ecosistémica y la seguridad alimentaria.

No obstante, las predicciones computacionales deben interpretarse con cautela debido a que la eficacia real depende de factores como concentración, estabilidad, vías de entrega en la colmena y la ecología microbiana local. Como consecuencia, es necesario subrayar limitaciones. Las predicciones *in silico* requieren interpretación crítica. Las energías de docking y las anotaciones funcionales son indicativas y dependen de la calidad de los modelos estructurales, de la parametrización del cribado y de la representatividad de las secuencias analizadas. La eficacia real depende de la validación experimental que sigue siendo imprescindible para confirmar eficacia, seguridad y efectos no deseados en el ecosistema. Es necesario, además, ampliar muestreos geográficos y temporales para robustecer correlaciones con indicadores agronómicos. La integración de datos multi-ómicos (metagenómica, metabolómica/volatilómica, proteómica) y ensayos de campo será clave para traducir predicciones computacionales en intervenciones agronómicas efectivas.

Como líneas futuras se proponen el desarrollo de protocolos estandarizados para evaluar seguridad ecológica de probióticos apícolas, ensayos de campo a escala regional que cuantifiquen impactos sobre rendimiento y economía agrícola, y el modelado integrado que combine datos metagenómicos con modelos agronómicos para estimar con mayor precisión los beneficios potenciales sobre producción, distribución y comercialización de alimentos.

Conclusiones y recomendaciones

Los estudios *in silico* de la microbiota de abejas han emergido como un campo interdisciplinario que conecta la biología computacional con la agronomía. Su importancia radica en que permiten identificar compuestos biológicamente activos y marcadores microbianos que influyen directamente en la salud de las colonias y por ende, en la eficiencia de los servicios de polinización esenciales para la agricultura sostenible. Constituyen un puente entre la investigación básica y la innovación agronómica. Su aplicación fortalece la seguridad alimentaria, la sostenibilidad agrícola y la resiliencia de los sistemas productivos, posicionándolos como un componente esencial en la transición hacia una agricultura más eficiente y responsable.

En resumen, abre un horizonte de innovación para la agronomía, ofreciendo herramientas que, una vez validadas experimentalmente, pueden transformar la gestión de la salud de las abejas y optimizar la productividad agrícola de manera sostenible.

Literatura citada

Almeida, E.L., Ribiere, C., Frei, W. *et al.* (2023) Geographical and Seasonal Analysis of the Honeybee Microbiome. *Microb Ecol* 85, 765–778. https://doi.org/10.1007/s00248-022-01986-x

Anderson, K. E., Carroll, M. J., Sheehan, T., & Mott, B. M. (2024). The honey bee "hive" microbiota: Meta-analysis reveals a native and aerobic microbiota prevalent throughout the social resource niche. *Frontiers in Bee Science, 2*, 1–15. https://doi.org/10.3389/fbees.2024.00002

Bordin, F., Peruzzo, A., Zamperin, G., Palumbo, E., Milani, A., Orsini, M., Fusaro, A., Bertola, M., Mogliotti, P., Cerioli, M. P., Formato, G., Ricchiuti, L., Cerrone, A., Troiano, P., Salvaggio, A., Pintore, A., Mutinelli, F., & Granato, A. (2026). First Molecular and Metagenomic Investigation of the Italian Honey Bee (*Apis mellifera*) Microbiome. *Applied Sciences*, *16*(7), 3521. https://doi.org/10.3390/app16073521

Braglia, C., Rudelli, C., Tinti, A. et al. (2025) Unravelling pollen diet and microbiome influence on honey bee health. Sci Rep 15, 13474. https://doi.org/10.1038/s41598-025-96649-5.

Caesar L, Rice DW, McAfee A, Underwood R, Ganote C, Tarpy DR, Foster LJ, Newton ILG. (2024) Metagenomic analysis of the honey bee queen microbiome reveals low bacterial diversity and Caudoviricetes phages. mSystems. 9(2):e0118223. doi: 10.1128/msystems.01182-23. Epub 2024 Jan 23. PMID: 38259099; PMCID: PMC10878037.

Cuanalo Contreras, L. K., Merino Contreras, S. A., & Scior, T. (2011). ¿Qué sabe Ud. acerca de... Cribado Virtual?. *Revista mexicana de ciencias farmacéuticas*, *42*(2), 54-55.

del Águila Conde, M., & Febbraio, F. (2022). Risk assessment of honey bee stressors based on in silico analysis of molecular interactions. *EFSA Journal*, *20*, e200912.

Eadie, A.L., Lynch, H.F., Scheinerman, N. *et al.* (2026) The arrival of digital twins and in silico trials in drug development. *Nat Med* 32, 1967–1971. https://doi.org/10.1038/s41591-026-04344-3.

Engel, P., Martinson, V. G., & Moran, N. A. (2012). Functional diversity within the simple gut microbiota of the honey bee. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(27), 11002-11007.

Fido, M., Moriano-Gutierrez, S., Lan, J., Pirat, A., Zufferey, L., Cappio Barazzone, E., ... & Slack, E. (2025). Real-time volatilomics reveals microbiota and pathogen fingerprints in the honey bee. *bioRxiv*, 2025-10. doi: https://doi.org/10.1101/2025.10.30.685588

Galanis, A., Vardakas, P., Reczko, M., Harokopos, V., Hatzis, P., Skoulakis, E. M. C., Pavlopoulos, G. A., & Patalano, S. (2022). *Bee foraging preferences, microbiota and pathogens revealed by direct shotgun metagenomics of honey*. *Molecular Ecology Resources*, 22, 2506–2523. https://doi.org/10.1111/1755-0998.13626

Hariprasath K, Mohankumar S, Sudha M, Saranya N, Saminathan VR. (2025) The Role of Honeybee Gut and Honey Microbiome in Sustainable Bee and Human Health. *J Pure Appl Microbiol.*19(1):19-33. doi: 10.22207/JPAM.19.1.03

Hariprasath, K., Mohankumar, S., Sudha, M., Saranya, N., & Saminathan, V. R. (2025). The role of honeybee gut and honey microbiome in sustainable bee and human health. Journal of Pure and Applied Microbiology, 19(1), 19-33. doi: 10.22207/JPAM.19.1.03

Lang H, Liu Y, Duan H, Zhang W, Hu X, Zheng H. (2023) Identificación de péptidos de simbiontes intestinales de abeja como agentes antimicrobianos potenciales contra *Melissococcus plutonius. Nat Commun* 14(1), 7650. https://doi.org/10.1038/s41467-023-43352-6

López, D. A. (2025). *Modulación de la microbiota intestinal de Apis mellifera por parásitos de interés apícola* (Doctoral dissertation) Universidad Complutense de Madrid.

Luzuriaga, V. A. C., Pato, J. Á. G., Muñoz, E. A. O., & Naranjo, C. D. G. (2026). Desarrollo de modelos predictivos *in silico* para descubrimiento de fármacos y péptidos terapéuticos: revisión de machine learning, docking molecular y dinámica molecular. *Polo del Conocimiento*, *11*(6), 617-635.

Martínez Hernández, S., Flores Domínguez, B., Espejel Terreros, M., & Castellanos, I. (2026). Bacterias patógenas oportunistas en la microbiota de Apis mellifera en localidades con diferente uso de suelo en el estado de Hidalgo. Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias, 17(2), e1726981. https://doi.org/10.22319/rmcp.v17i2.6981

Motta EVS, Moran NA. (2024) The honeybee microbiota and its impact on health and disease. Nat Rev Microbiol. 22(3):122-137. doi: 10.1038/s41579-023-00990-3.

Navarro-Muñoz, J.C., Selem-Mojica, N., Mullowney, M.W. *et al.* (2020) Un marco computacional para explorar la diversidad biosintética a gran escala. *Nat Chem Biol* 16, 60–68. https://doi.org/10.1038/s41589-019-0400-9

Prasad, A., Pallujam, A. D., Siddaganga, R., Suryanarayanan, A., Mazel, F., Brockmann, A., ... & Engel, P. (2025). Evolution of gut microbiota across honeybee species revealed by comparative metagenomics. *Nature Communications*, *16*(1), 9069. Doi: 10.1038/s41467-025-64115-5

Prasad, A., Pallujam, A.D., Siddaganga, R. *et al.* (2025) Evolution of gut microbiota across honeybee species revealed by comparative metagenomics. *Nat Commun* 16, 9069. https://doi.org/10.1038/s41467-025-64115-5

Qianmin Hai, Dufu Li, Tingyue Huang, Xiaoqun Dang, Jinshan Xu, Zhengang Ma, Zeyang Zhou, (2026) The honeybee gut microbiome: a novel multidimensional model of antimicrobial resistance transmission and immune homeostasis from environmental interactions to health regulation, *FEMS Microbiology Reviews*, 50, fuag001, https://doi.org/10.1093/femsre/fuag001

Romero S., Nastasa A., Chapman A., Kwong WK, Foster LJ. (2019) The honey bee gut microbiota: strategies for study and characterization. Insect Molecular Biology. 28(4). https://translate.google.com/website?sl=en&tl=es&hl=es&client=srp&u=https://doi.org/10.1111/imb.12567

Roumia, A. F., Basiouny, E. A., Abdelaal, A. A., Abozid, M. M., & Tsirigos, K. D. (2024). In silico identification of novel drug targets in the honeybee pathogen Paenibacillus larvae and molecular docking studies. *ACS Agricultural Science & Technology*, *4*(10), 1046-1053.

Rüstemoğlu, M. (2023). Next Generation Sequencing of Bee Gut Microbiota in Urban and Rural Environments. *Diversity*, *15*(9), 1016. https://doi.org/10.3390/d15091016

Smutin, D., Lebedev, E., Selitskiy, M., Panyushev, N., & Adonin, L. (2022). Micro"bee"ota: Honey Bee Normal Microbiota as a Part of Superorganism. *Microorganisms*, *10*(12), 2359. https://doi.org/10.3390/microorganisms10122359

Sun, H., Mu, X., Zhang, K., Lang, H., Su, Q., Li, X., Zhou, X., Zhang, X., & Zheng, H. (2022). *Geographical resistome profiling in the honeybee microbiome reveals resistance gene transfer conferred by mobilizable plasmids.* Microbiome, 10, 69. https://doi.org/10.1186/s40168-022-01268-1

Tilocca B, Greco V, Piras C, Ceniti C, Paonessa M, Musella V, Bava R, Palma E, Morittu VM, Spina AA, Castagna F, Urbani A, Britti D, Roncada P. (2024) La microbiota intestinal de abeja: el potencial de los agentes infecciosos puente en un solo contexto de salud. Int J Mol Sci. 25(7):3739. doi: 10.3390/ijms25073739. PMID: 38612550; PMCID: PMC11012054.

Tran L, Lansing L, Cunningham M, Ho J, Deckers T, Newman T, Wu L, Gregoris AS, Zorz J, Muntz L, Lee K, Trépanier-Leroux D, Conflitti IM, Pepinelli M, Walsh EM, Morfin N, Powell JE, Moran N, Hoover SE, Pernal SF, Currie RW, Giovenazzo P, Guzman-Novoa E, Jabbari H, Foster LJ, Zayed A, Ortega Polo R, Guarna MM. (2025) Gut microbiome metagenomic sequences of honey bees (*Apis mellifera*) exposed to crops. Microbiol Resour Announc 14:e00731-24. https://doi.org/10.1128/mra.00731-24

Vega MF, Libonatti C, Ramos OY, Basualdo M. (2024) Caracterización de una comunidad microbiana aislada de colonias de abejas melíferas. Rev Argent Microbiol. 56:265-9. DOI: 10.1016/j.ram.2024.01.001

Vincent A. Ricigliano, Julia D. Fine, Sascha C.T. Nicklisch. (2026) Harnessing biotechnology for bee pollinator health. Trends in Biotechnology, 44(1): 0167-7799. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2025.05.027

Zhang, Z., Guo, Y., Yang, F., & Li, J. (2022). El análisis pangenomico revela divergencias funcionales en *Gilliamella* y *Snodgrassella* con restricción intestinal. *Bioingeniería*, *9*(10), 544. https://doi.org/10.3390/bioengineering9100544

Zheng, H., Steele, M.I., Leonard, S.P. et al. Honey bees as models for gut microbiota research. Lab Anim47, 317–325 (2018). https://doi.org/10.1038/s41684-018-0173-x

Nanopartículas de óxido de zinc en la colorimetría de fresa

Disraeli Eron Moreno-Guerrero[87], Mario Pérez-Grajales[88], Eduardo Santiago-Elena[89], Francisco Farias-Oregel[90]

Resumen

El empleo de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) ha crecido recientemente por su versatilidad en diversas áreas científicas. No obstante, existe incertidumbre sobre sus efectos en la calidad poscosecha de cultivos frutales, ya que la aplicación de estas partículas puede variar drásticamente según la especie y la concentración, planteando el desafío de encontrar dosis óptimas que mejoren la calidad del producto final sin comprometer la fisiología vegetal. El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc en el indicador de calidad de color en fresa cultivar Albión. El experimento se estableció en invernadero en el campo agrícola experimental de la UACh, Texcoco, Estado de México, en el año 2026. Como material vegetal se utilizaron plantas de fresa cultivar Albión que se colocaron en un sistema hidropónico abierto. Posteriormente, se aplicaron NPsZnO vía raíz (0, 60, 120, 180, 240 mg L^{-1}) respectivamente. A los 100 días después del inicio de tratamientos se determinó de la colorimetría (Luminosidad, ángulo de tono HUE e índice de saturación CHROMA) con un colorímetro General Colorimeter MeterTo® modelo JZ-300-China. Como resultados se obtuvo que se mejoró la colorimetría mediante los tratamientos de 180 y 240 mg L^{-1} NPsZnO en la luminosidad, Angulo de tono Hue e Índice de saturación (CRHOMA) respectivamente. De manera concluyente, los efectos de las aplicaciones de NPsZnO vía raíz acrecentaron la colorimetría de frutos de fresa cultivar Albión siendo las NPsZnO una alternativa viable en la seguridad alimentaria de México.

[87] Instituto de Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, México.
dmorenog@chapingo.mx
[88] Instituto de Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, México.
mperezg@chapingo.mx
[89] Centro de Investigación en Gestión de la Agroecología. Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, México. esantiagoe@chapingo.mx
[90] Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, México. al26510121@chapingo.mx

Palabras clave: *Fragaria x ananassa* Duch, nanotecnología, indicador, calidad, poscosecha.

Abstract

The use of zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) has recently increased due to their versatility across diverse scientific fields. However, there is uncertainty regarding their effects on the postharvest quality of fruit crops, as the application of these particles can vary drastically depending on the species and concentration, posing the challenge of identifying optimal dosages that enhance end-product quality without compromising plant physiology. The objective of this research was to evaluate the effect of ZnO NPs application on the color quality parameters of strawberry cultivar 'Albión'. The experiment was conducted in a greenhouse at the UACh experimental agricultural field, Texcoco, State of Mexico, in 2026. Strawberry plants (cv. 'Albión') were grown in an open
hydroponic system. Subsequently, ZnO NPs were applied via the root system at concentrations of 0, 60, 120, 180, and 240 mg L^{-1}, respectively. One hundred days after the onset of treatments, colorimetric analysis (Lightness, HUE angle, and CHROMA saturation index) was performed using a General Colorimeter MeterTo® model JZ-300. Results demonstrated that colorimetric attributes were improved by the 180 and 240 mg L^{-1} ZnO NPs treatments regarding lightness, HUE angle, and CHROMA index, respectively. In conclusion, root-applied ZnO NPs enhanced the color quality of 'Albión' strawberry fruits, establishing ZnO NPs as a viable alternative for improving food security in Mexico.

Keywords: *Fragaria x ananassa* Duch, nanotechnology, indicator, quality, postharvest.

Introducción

La fresa es una especie que pertenece a la familia de las Rosáceas que se consume ampliamente en fresco o en forma procesada y que posee compuestos bioactivos como los fenoles que tienen enormes potencialidades biológicas en los seres humanos (Afrin *et al*., 2016). La clase principal de compuestos fenólicos está representada por los flavonoides donde se encuentran las antocianinas y flavonoles, seguidos de los taninos hidrolizables y

finalmente, los ácidos fenólicos donde están los ácidos hidroxibenzoicos y ácidos hidroxicinámicos (Aaby *et al*., 2012).

En la producción mundial de fresa, para el año 2025 alcanzó poco más de 12.9 millones de toneladas, concentrándose la producción de fresa en Asia con una producción de alrededor de 5.9 millones de toneladas. Además, para el mismo año, América y Europa se encuentran en el segundo y tercer lugar con una contribución de producción que alcanzó los 3.4 millones de toneladas y 2.6 millones toneladas respectivamente. Mientras tanto, Oceanía se encuentra en la última posición con una producción en torno a las 93 mil toneladas. Siendo China, Estados Unidos, Turquía, Egipto, México y España los máximos productores (FAOSTAT, 2026).

El consumo anual per cápita de fresa en México en 2025 fue de 2.4 kg (SIAP, 2026). Actualmente, el rápido crecimiento demográfico y el correspondiente aumento en el suministro de fresa motivan la investigación sobre la optimización de su producción (Zacharaki *et al*., 2023).

El desarrollo de insumos agrícolas basados en nanomateriales, como nanofertilizantes y nanopesticidas, ha provocado una revolución tecnológica en la industria agrícola moderna y sostenible, a su vez, los nanomateriales ofrecen un gran potencial para mejorar la administración de insumos agrícolas, suprimir la actividad patógena, mejorar el rendimiento, la calidad y la vida postcosecha de los cultivos de interés agronómico (Singh *et al.,* 2020). A su vez, la nanotecnología agrícola se caracteriza por ser una ciencia emergente para la fabricación de materiales escala nanométricas como nanopesticidas, nanobioestimulantes pero sobre todo nanofertilizantes (Albrecht *et al*., 2006).

Las nanopartículas (NPs) son los portadores de nutrimentos en una escala de 1 a 100 nm que son capaces de contener una gran cantidad de iones debido a su gran superficie de contacto, tamaño, alta reactividad y dispersión (Subramanian *et al*., 2015). Se estima que los NPs se asimilan entre 15 y 20 veces más en comparación con insumos agrícolas convencionales y su eficacia varía según la concentración, tamaño, forma, recubrimiento y polaridad. Así mismo, los nanofertilizantes cuando se accesan, absorben, translocan y asimilan se liberan de manera gradual a diferencia de los fertilizantes convencionales (Rajput *et al*., 2018).

El zinc (Zn) es el micronutrimento indispensable generalmente absorbido como catión divalente (Zn^{++}) lo que limita el desarrollo de los cultivos. Así también, el Zn estimula las concentraciones de auxinas mediante la regulación de la síntesis de triptófano que es un precursor de ácido indol-3-acético que provoca la elongación celular y contribuye a la producción de biomasa en plantas superiores hasta la síntesis de proteínas y el metabolismo de carbohidratos (Sharma *et al*., 2013).

Existen diferentes fuentes Zn como el sulfato de zinc ($ZnSO_4$), el óxido de zinc (ZnO), ácido etilendiaminotetraacético de zinc (Zn EDTA) y nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) que se utilizan como nanofertilizantes. Sin embargo, el $ZnSO_4$ es la fuente más común y barata para corregir deficiencia en cultivos y suelos en comparación con fuentes de Zn escasamente solubles, como quelatos. En la nutrición vegetal convencional el $ZnSO_4$ y Zn EDTA se puede utilizar como complemento mediante una aplicación via foliar y vía raíz, sin embargo, la eficiencia en el uso de estas fuentes de Zn es insignificante (Fageria *et al.*, 2002).

Ciertas investigaciones han reportado que, al usar como fuente de Zn a las NPsZnO se mejora su proceso de absorción durante las etapas fenológicas de determinado cultivo, además de que es imprescindible tener costos de producción bajos y una solución rápida y óptima para una nutrición eficiente a base de Zn en la producción agrícola. Las NPsZnO modifican el efecto de las auxinas regulando la síntesis de triptófano e influyendo en la calidad de la fruta (Iziy *et al*., 2019).

Además, actúan como cofactor de la actividad de muchas enzimas como la superóxido dismutasa (SOD), la glutatión peroxidasa (GPX) y la fenilalanina amoníaco-liasa (PAL) (Karimzadeh *et al*., 2019). Actualmente, hay mínima información disponible sobre los efectos de las nanopartículas de óxido de zinc. Por lo tanto, el presente estudio fue planificado con el objetivo de evaluar el efecto de la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc a dosis crecientes en el color de fresa cultivar Albión.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en el campo agrícola experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, en el año 2026. El campo agrícola experimental está ubicado en 19.4661° de latitud norte y -98.8538° de longitud oeste a una altitud de 2250 m. Para dicho experimento se colocaron 60 bolsas negras para vivero 30 x 30 cm usando como sustrato al tezontle y se instaló un sistema hidropónico abierto y se utilizó fresa cultivar Albión estableciendo un diseño experimental de bloques completamente al azar generalizado (DBCAG) estableciendo 4 bloques con 5 tratamientos donde se ensayó cada tratamiento 3 veces para el experimento de aplicación de nanopartículas de óxido de zinc dando un total de 60 unidades experimentales.

La nutrición de las plantas se realizó en base a la solución nutritiva universal de Steiner (1984). La aplicación de nanopartículas de óxido de zinc consistió en 5 tratamientos que fueron 0, 60, 120, 180 y 240 mg L^{-1} aplicados en 9 intervalos diferentes, es decir, a los 11, 22, 33, 44, 55, 66, 77, 88 y 99 días después del inicio de tratamientos. La determinación de la colorimetría (Luminosidad, ángulo de tono HUE e índice de saturación CHROMA) se realizó a los 100 días después del inicio de tratamientos con un colorímetro General Colorimeter MeterTo® modelo JZ-300-China.

Con los datos obtenidos, se realizó un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey, con un nivel de significancia de 0.05, utilizando el paquete estadístico SAS 9.4.

Resultados y discusión

Cuadro 1. Indicadores de calidad de luminosidad, ángulo de tono HUE e índice de saturación CHROMA en fresa cultivar Albión, asperjado con 0, 60, 120, 180 y 240 mg L^{-1} NPsZnO vía raíz, a los 100 días después del inicio de tratamientos.

Tratamientos (mg L^{-1} NPsZnO)	Luminosidad	Ángulo de tono HUE	Índice de saturación (CRHOMA)
0	24.17 ± 0.42 d	24.86 ± 0.83 c	16.88 ± 0.63 e
60	30.21 ± 0.33 c	30.11 ± 0.75 b	20.07 ± 0.24 d
120	30.70 ± 0.54 bc	30.27 ± 0.82 b	24.77 ± 0.42 c
180	31.34 ± 0.35 b	35.17 ± 1.02 a	35.19 ± 0.11 a
240	36.61 ± 0.71 a	32.65 ± 0.57 b	29.15 ± 0.59 b
R^2	0.776	0.614	0.856
CV	3.154	6.975	6.554

Medias ± DE con letras diferentes en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). NPsZnO = Nanopartículas de óxido de zinc.

La luminosidad del fruto de fresa a través de la aplicación de NPsZnO vía raíz mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. El tratamiento que tuvo mayor luminosidad (36.61) se alcanzó con plantas suministradas con 240 mg L^{-1} NPsZnO (Cuadro 1).

En un estudio desarrollado por Sogvar *et al*. (2016) realizada en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) encontró que, aplicaciones de nanopartículas de óxido de zinc (NPsZnO) en 3000 mg L^{-1} incrementaron la luminosidad recalcando que las NPsZnO actúan eficientizando la actividad enzimática que suprime la liberación del regulador de crecimiento etileno retrasando la senescencia.

El ángulo de tono HUE en fruto de fresa que indica una coloración ya sea verde o rojiza mediante la aplicación de NPsZnO vía raíz mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. El tratamiento que tuvo mayor ángulo de tono HUE (35.17) se alcanzó con plantas suministradas con 180 mg L^{-1} NPsZnO vía raíz (Cuadro 1).

Abd-El *et al*. (2024) en su investigación en frutos de granada (*Punica granatum*) descubrió que, aplicaciones de nanopartículas de óxido de zinc en 1000 mg L^{-1} incrementaron el ángulo de tono HUE destacando que las NPsZnO actúan reduciendo los pigmentos de clorofila y aumentan las concentraciones de antocianinas.

El índice de saturación (CHROMA) en fruto de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) que indica cuán puro, intenso o vivo es un color a través de la aplicación de NPsZnO vía raíz mostraron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. El tratamiento que tuvo mayor índice saturación (35.19) se alcanzó con plantas suministradas con 180 mg L^{-1} NPsZnO vía raíz respectivamente (Cuadro 1).

Anean *et al*. (2023) en su investigación sobre fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) coincidió con lo obtenido en la presente investigación a través de aplicaciones de nanopartículas de óxido de zinc en 1000 mg L^{-1} aumentando el índice de saturación reporto que las NPsZnO modifican los componentes bioquímicos de antocianinas, xantofilas, carotenos y clorofilas.

Conclusión

Mediante el análisis de los resultados, se mostró un efecto positivo de la aplicación de nanopartículas de óxido de zinc en fresa cultivar Albión en el indicador de calidad de colorimetría al bioestimular procesos bioquímicos, fisiológicos y agronómicos que estimularon la producción de compuestos antioxidantes. Finalmente, se recomienda en el cultivo de fresa cultivar Albión la aplicación de las dosis de NPsZnO de 180 y 240 mg L^{-1} vía raíz respectivamente, para lograr incrementar las variables medidas de colorimetría denotando con ello que las nanopartículas de óxido de zinc son una alternativa viable como nanofertilizante en la producción agrícola en beneficio de la soberanía alimentaria de México.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma Chapingo.

Literatura citada

Libro

Steiner A. A. (1984). The universal nutrient solution. Proceeding 6th International congress on soilless culture. ISOSC, 633–650.

Revista

Aaby, K., Mazur, S., Nes, A., and Skrede, G. (2012). Phenolic compounds in strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) fruits: Composition in 27 cultivars and changes during ripening. *Food chemistry*, 132(1), 86-97. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.037

Abd El, A. E. W. N., Khalifa, S. M., Alqahtani, M. D., Abd–Alrazik, A. M., Abdel-Aziz, H., Mancy, A., ... & Elkelish, A. (2024). Nano-enhanced growth and resilience strategies for Pomegranate cv. Wonderful: Unveiling the impact of zinc and boron nanoparticles on fruit quality and abiotic stress management. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15(2024), 100908. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100908

Afrin, S., Gasparrini, M., Forbes-Hernandez, T. Y., Reboredo-Rodriguez, P., Mezzetti, B., Varela-López, A., Giampieri, F. & Battino, M. (2016). Promising health benefits of the strawberry: a focus on clinical studies. *Journal of agricultural and food chemistry*, 64(22),4435-4449. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.6b00857

Albrecht, M. A., Evans, C. W., & Raston, C. L. (2006). Green chemistry and the health implications of nanoparticles. *Green chemistry*, 8(5), 417-432. https://doi.org/10.1039/b517131h

Anean, H. A., Mallasiy, L. O., Bader, D. M., & Shaat, H. A. (2023). Nano edible coatings and films combined with zinc oxide and pomegranate peel active phenol compounds has been to extend the shelf life of minimally processed pomegranates. *Materials*, 16(4),1569. https://doi.org/10.3390/ma16041569

Fageria, N. K., Baligar, V. C., & Clark, R. B. (2002). Micronutrients in crop production. *Advances in agronomy*, 77(2022), 185-268. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)77015-6

Iziy, E., Majd, A., Vaezi-Kakhki, M. R., Nejadsattari, T., & Noureini, S. K. (2019). Effects of zinc oxide nanoparticles on enzymatic and nonenzymatic antioxidant content, germination, and biochemical and ultrastructural cell characteristics of Portulaca oleracea L. *Acta Soc. Bot. Pol*, 88(4),3639. http://dx.doi.org/10.5586/asbp.3639

Karimzadeh, F., Haddad, R., Garoosi, G. H., & Khademian, R. (2019). Effects of nanoparticles on activity of lignan biosynthesis enzymes in cell suspension culture of *Linum usitatissimum* L. *Russian journal of plant physiology*, 66(5), 756-762. https://doi.org/10.1134/S1021443719050078

Rajput, V. D., Minkina, T. M., Behal, A., Sushkova, S. N., Mandzhieva, S., Singh, R., ... & Movsesyan, H. S. (2018). Effects of zinc-oxide nanoparticles on soil, plants, animals and soil organisms: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 9(2018), 76-84. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2017.12.006

Sharma, A., Patni, B., Shankhdhar, D., & Shankhdhar, S. C. (2013). Zinc–an indispensable micronutrient. *Physiology and molecular biology of plants*, 19(1), 11-20. https://doi.org/10.1007/s12298-012-0139-1

Singh, R. P., Handa, R. & Manchanda, G. (2020). Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of Controlled Release*, 7(329),1234-1248. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.051

Sogvar, O. B., Koushesh-Saba, M., Emamifar, A. & Hallaj, R. (2016). Influence of nano-ZnO on microbial growth, bioactive content and postharvest quality of strawberries during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies,* 35(2016):168-176. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.05.005

Subramanian, K. S., Manikandan, A., Thirunavukkarasu, M., & Rahale, C. S. (2015). Nano-fertilizers for Balanced Crop Nutrition. In *Nanotechnologies in Food and Agriculture* (pp. 69 - 80). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14024-7_3

Zacharaki, A. K., Monaghan, J. M., Bromley, J. R. & Vickers, L. H. (2024). Opportunities and challenges for strawberry cultivation in urban food production systems. *Plants, People, Planet*, 7(2024),1-11. https://doi.org/10.1002/ppp3.10475

Referencia electronica

FAOSTAT. (2026). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Consultado En línea: http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx (07/07/2026)

SIAP. (2026). Servicio De Información Agroalimentaria y Pesquera. Consultado En línea: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemi (07/07/2026)

Nanopartículas de plata en el crecimiento de fresa

Disraeli Eron Moreno-Guerrero[91], Mario Pérez-Grajales[92], Catalino Jorge López-Collado[93], Arely Flores-Núñez[94]

Resumen

Las nanopartículas de plata (NPsAg) tienen varias aplicaciones en la agricultura, principalmente para el manejo integral enfermedades y la promoción del crecimiento vegetal. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación en dosis continuas en variables crecimiento de nanopartículas de plata (NPsAg) en el cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) cultivar 'Festival' bajo un sistema hidropónico abierto. El experimento se estableció en un invernadero en el campo agrícola experimental de la UACh, Texcoco, Estado de México, en el año 2026. Como material vegetal se utilizaron plantas de fresa cultivar 'Festival'. Posteriormente, se aplicaron NPsAg vía raíz (0, 6, 12, 18, 24 mg L^{-1}) respectivamente. Se registraron variables de crecimiento a los 100 días después del inicio de tratamientos de altura de planta (cm), número de flores, frutos y estolones. Los resultados mostraron que la aplicación de NPsAg generó un efecto significativo de forma positiva en las variables respuesta. De manera concluyente los efectos de las aplicaciones de NPsAg vía raíz en la concentración de 18 mg L^{-1} acrecentó altura de planta (19.6 cm), número de flores (8.6), número de frutos (10.2) y número de estolones (4.3) respectivamente. Con ello se demuestra que las nanopartículas de plata logran incrementar las variables de crecimiento registradas impactando menormente en el ambiente y convirtiéndose en una alternativa en la producción de fresa en beneficio de la soberanía alimentaria.

[91] Instituto de Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, México.
dmorenog@chapingo.mx
[92] Instituto de Horticultura. Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, México.
mperezg@chapingo.mx
[93] Colegio de Postgraduados-Campus Veracruz, México. CP. 91690, Carretera Federal Xalapa-Veracruz Km 88.5, Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México. ljorge@colpos.mx
[94] Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, México. afloresn@chapingo.mx

Palabras clave: *Fragaria x ananassa* Duch., bionanotecnología, nanomateriales, desarrollo, frutillas.

Abstract

The Silver nanoparticles (NPsAg) have several applications in agriculture, mainly for the comprehensive management of diseases and the promotion of plant growth. The aim of this study was to evaluate the effect of continuous dose application in variable nanoparticle growth variables silver (NPsAg) in strawberry cultivation (*Fragaria x ananassa* Duch.) grow 'Festival' under an open hydroponic system. The experiment was established in a greenhouse in the experimental agricultural field of the UACh, Texcoco, State of Mexico, in the year 2026. As plant material, the following were used strawberry cultivar plants 'Festival'. Subsequently, NPsAg were applied via root (0, 6, 12, 18, 24 mg L^{-1}) respectively. They registered 100 day growth variables after the start of treatments of plant height (cm), number of flowers, fruits and stolons. The results showed that the application of NPsAg generated a significant positive effect on the response variables. In a way The effects of root based NPsAg applications on the concentration of 18 mg L^{-1} increased plant height (19.6 cm), number of flowers (8.6), number of fruits (10.2) and number of stolons (4.3) respectively. This shows that silver nanoparticles achieve increase the growth variables recorded, with a lesser impact on environment and becoming an alternative in strawberry production in benefit of food sovereignty.

Keywords: *Fragaria x ananassa* Duch., bionanotechnology, nanomaterials, development, strawberries.

Introducción

La fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) es un fruto agregado considerado como una "berry" que tiene una alta demanda a nivel nacional y mundial (SIAP, 2026). La producción mundial anual estimada fue de 14,845,314.9 toneladas, en donde México ocupó el cuarto lugar en producción aportando un total de 696,112.6 toneladas (FAOSTAT, 2026).

Actualmente, se conoce los riesgos que algunos de los bioestimulantes más usados conllevan; se ha informado de la toxicidad y alteraciones en el desarrollo de organismos acuáticos y terrestres (Valera *et al*., 2018). Por otro lado, existen pesticidas organofosforados y carbamatos que generan lesiones dermatológicas a personas expuestas directamente a los productos (Luna *et al*., 2015).

Bajo este contexto, surge la necesidad de producir alimentos inocuos, ambientalmente sustentables y de reducir el consumo de bioestimulantes y fertilizantes nocivos para la salud. La nanotecnología surge como un avance tecnológico que puede transformar sectores de la agricultura, mejorando la capacidad de las plantas para accesar, absorber, translocar y asimilar ciertos nanomateriales reduciendo el impacto ambiental (Lira-Saldivar *et al*., 2018).

La nanotecnología agrícola ha mostrado un crecimiento importante durante los últimos años debido a su potencial para incrementar la eficiencia en el uso de nutrimentos, reducir pérdidas por lixiviación y volatilización, así como mejorar el crecimiento y productividad de los cultivos (Singh *et al*., 2020). Los nanomateriales poseen propiedades fisicoquímicas particulares derivadas de su reducido tamaño, alta relación superficie-volumen, elevada reactividad y capacidad de interacción con sistemas biológicos, características que les permiten actuar de manera más eficiente en comparación con insumos convencionales (Kopittke *et al*., 2019). Además, el uso de nanopartículas en la agricultura ha abierto nuevas perspectivas para el desarrollo de estrategias sostenibles enfocadas en la seguridad alimentaria y la reducción del impacto ambiental derivado del uso excesivo de agroquímicos (Rautela *et al*., 2021).

Las nanopartículas de plata se encuentran entre las más estudiadas, ya que se les han dado varios usos en diversos sectores, entre ellos la agricultura. Se le atribuyen características como nanopesticidas y nanobioestimulantes. Además, estudios muestran que en cierta dosis han sido efectivas en la germinación y crecimiento de plantas superiores (Khan *et al*., 2023).

Las NPsAg presentan propiedades únicas como alta conductividad, elevada estabilidad química y una amplia actividad antimicrobiana, lo que ha favorecido su aplicación en sistemas agrícolas y agroalimentarios. Su mecanismo de acción antimicrobiano se relaciona principalmente con la liberación de iones plata, generación de especies reactivas de oxígeno y alteraciones en la membrana celular de microorganismos fitopatógenos (Jo *et al*., 2009). Así mismo, las nanopartículas de plata poseen una elevada área superficial que favorece su

interacción con tejidos vegetales, permitiendo mejorar procesos fisiológicos relacionados con la absorción de agua y nutrimentos, actividad fotosintética y metabolismo antioxidante en plantas (Saha y Gupta, 2018).

Diversos estudios han señalado que las nanopartículas metálicas pueden comportarse como bioestimulantes inorgánicos capaces de promover respuestas fisiológicas positivas en las plantas cuando son aplicadas en concentraciones adecuadas (Delfani *et al*., 2014). En este sentido, las NPsAg han mostrado efectos favorables sobre variables de crecimiento, producción de biomasa, contenido de clorofila y actividad antioxidante en diferentes especies vegetales. También se ha reportado que las nanopartículas de plata inducen mecanismos de tolerancia al estrés abiótico y biótico mediante la activación de enzimas antioxidantes y la regulación de fitohormonas involucradas en el crecimiento vegetal (Kale *et al*., 2021).

En cultivos hortofrutícolas, particularmente en fresa, la nanotecnología ha despertado interés debido a la necesidad de incrementar la productividad y mejorar la calidad de fruto bajo esquemas de producción sustentable. Investigaciones recientes reportan que la aplicación de nanopartículas metálicas puede mejorar parámetros agronómicos y poscosecha en frutos de fresa, incluyendo firmeza, color y contenido antioxidante (Zahedi *et al*., 2020). Del mismo modo, Sogvar *et al.* (2016) señalaron que el uso de nanopartículas metálicas en frutos de fresa permitió disminuir el crecimiento microbiano y retrasar procesos de senescencia durante almacenamiento. Asimismo, se ha informado que los nanomateriales pueden mejorar la eficiencia fisiológica de las plantas al favorecer procesos fotosintéticos y el metabolismo secundario asociado con la síntesis de compuestos fenólicos y antioxidantes (Singh *et al*., 2015).

Existen nanopartículas de plata de diferentes métodos de síntesis: físicos, químicos y biológicos. En este caso se hará enfoqué en la síntesis biológica, ya que es un método más amigable con el medio ambiente, de donde se obtiene un producto altamente estable y abre el panorama a métodos mucha más económicos y sustentables (Elizondo-Hernández *et al*., 2021).

La síntesis biológica de nanopartículas de plata, también conocida como "green synthesis", utiliza extractos vegetales, hongos, bacterias y otros organismos biológicos como agentes reductores y estabilizantes para la formación de nanopartículas, evitando el uso de compuestos tóxicos empleados en métodos químicos convencionales. Este tipo de síntesis ha

tomado relevancia debido a que permite obtener nanopartículas con mayor biocompatibilidad y menor impacto ambiental, además de representar una alternativa económicamente viable para aplicaciones agrícolas sostenibles (Rónavári *et al*., 2021).

Por otra parte, el efecto de las NPsAg depende de factores como concentración, tamaño, forma, estabilidad y vía de aplicación, ya que concentraciones bajas pueden estimular el crecimiento vegetal mientras que dosis elevadas podrían generar efectos fitotóxicos (Kopittke *et al*., 2019). Por ello, es necesario continuar investigando las respuestas fisiológicas y agronómicas de las plantas superiores ante la aplicación de nanopartículas de plata, particularmente en cultivos de alto valor económico como la fresa, donde existe interés en desarrollar alternativas innovadoras que contribuyan a una agricultura más eficiente y sustentable.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en el campo agrícola experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, en el año 2026. El campo agrícola experimental está ubicado en 19.4661° de latitud norte y -98.8538° de longitud oeste a una altitud de 2250 m. Para dicho experimento se colocaron 75 bolsas negras para vivero 45 x 45 cm usando como sustrato al tezontle y se instaló un sistema hidropónico abierto y se utilizó fresa cultivar Festival estableciendo un diseño experimental de bloques completamente al azar generalizado (DBCAG) estableciendo 5 bloques con 5 tratamientos donde se ensayó cada tratamiento 3 veces para el experimento de aplicación de nanopartículas de plata dando un total de 75 unidades experimentales.

La nutrición de las plantas se realizó en base a la solución nutritiva universal de Steiner (1984). La aplicación de nanopartículas de plata consistió en 5 tratamientos que fueron 0, 6, 12, 18 y 24 mg L^{-1} aplicados en 8 intervalos diferentes, es decir, a los 12, 24, 36, 48, 60, 72, 84 y 96 días después del inicio de tratamientos.

La determinación de las variables de crecimiento del experimento se realizó a los 100 días después del inicio de tratamientos que fueron altura de planta (cm), número de flores, frutos y estolones.

Con los datos obtenidos, se realizó un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey, con un nivel de significancia de 0.05, utilizando el paquete estadístico SAS 9.4.

Resultados y discusión

Cuadro 1. Comparación de medias de variables de crecimiento altura de planta (cm), número de flores, frutos y estolones en fresa cv. Festival asperjadas con 0, 6, 12, 18 y 24 mg L^{-1} de NPsAg vía raíz, a los 100 días después del inicio de los tratamientos.

Tratamientos (mg·L^{-1} NPsAg)	Altura de planta (cm)	Número de flores	Número de frutos	Número de estolones
0	16.6 ± 0.77 c	5.7 ± 0.73 c	7.3 ± 0.67 c	2.5 ± 0.27 c
6	18.2 ± 0.27 b	7.4 ± 0.62 b	8.7 ± 0.25 b	3.2 ± 0.31 b
12	18.4 ± 0.72 ab	7.6 ± 0.55 b	9.1 ± 0.46 b	3.6 ± 0.41 ab
18	19.6 ± 0.61 a	8.6 ± 0.34 a	10.2 ± 0.71 a	4.3 ± 0.56 a
24	18.1 ± 0.43 b	7.3 ± 0.47 b	9.3 ± 0.53 b	3.1 ± 0.63 b
R^2	0.456	0.545	0.384	0.377
CV	5.736	17.852	15.101	33.154

Medias ± DE con letras diferentes en cada columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Tukey, $P \leq 0.05$). NPsAg = Nanopartículas de plata.

El tratamiento que obtuvo mayor altura de planta (19.6 cm) se alcanzó con plantas suministradas con 18 mg L^{-1} NPsAg vía raíz (Cuadro 1). Nghia *et al.* 2017 en crisantemo (*Chrysanthemum coronarium*) hallo que aplicaciones de nanopartículas de plata de 5 mg L^{-1} bioestimulan el aminoácido triptófano que es precursor del regulador de crecimiento auxinas que genera como resultado mayor altura.

Consecuentemente, el tratamiento que obtuvo mayor número de flores y frutos (8.6 y 10.2) se alcanzó con plantas suministradas con 18 mg L^{-1} NPsAg vía raíz (Cuadro 1). Salih *et al.* 2024 en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) encontró que aplicaciones de nanopartículas de

plata de 40 mg L^{-1} eficientizaron la absorción de macroelementos, procesos metabólicos como la fotosíntesis y respiración para una mayor generación de biomasa reflejada en mayor número de flores y frutos.

Consiguientemente, el tratamiento que tuvo mayor número de estolones (4.3) se logró con plantas suministradas con 18 mg L^{-1} NPsAg vía raíz (Cuadro 1). Tung *et al*. 2021 en fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) reportaron que 10 mg L^{-1} de NPsAg suprimieron la actividad del etileno y estimularon la actividad de las citoquininas lo cual se denotó en el acrecentamiento de estolones.

Conclusión

Mediante el análisis de los resultados, se mostró un efecto positivo de la aplicación de nanopartículas de plata en fresa cultivar Festival en las variables crecimiento registradas debido a la optimización de procesos metabólicos. Finalmente, se recomienda en el cultivo de fresa cultivar Festival la aplicación de la dosis de NPsAg de 18 mg L^{-1} vía raíz respectivamente, para lograr incrementar las variables de crecimiento denotando con ello que, las nanopartículas de plata son una alternativa viable como nanobioestimulante en la producción agrícola en beneficio de la soberanía alimentaria de México.

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma Chapingo.

Literatura citada

Libro

Steiner A. A. (1984). The universal nutrient solution. Proceeding 6th International congress on soilless culture. ISOSC, 633–650.

Revista

Delfani, M., Baradarn-Firouzabadi, M., Farrokhi, N., & Makarian, H. (2014). Some physiological responses of black-eyed pea to iron and magnesium nanofertilizers. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 45(4), 530-540. https://doi.org/10.1080/00103624.2013.863911

Elizondo-Hernández, R., Hernández-Gordillo, A., & Chávez-Montes, A. (2021). Green synthesis of silver nanoparticles and their applications in agriculture. *Molecules*, 26(7), 2007. https://doi.org/10.3390/molecules26072007

Jo, Y. K., Kim, B. H., & Jung, G. (2009). Antifungal activity of silver ions and nanoparticles on phytopathogenic fungi. *Plant Disease*, 93(10), 1037-1043. https://doi.org/10.1094/PDIS-93-10-1037

Kale, S. K., Parishwad, G. V., Husainy, A. S. N., & Patil, A. S. (2021). Emerging agriculture applications of silver nanoparticles. *ES Food & Agroforestry*, 3,(2021),17-22. https://doi.org/10.30919/esfaf438

Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2023). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(1), 104514. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104514

Kopittke, P. M., Lombi, E., Wang, P., Schjoerring, J. K., & Husted, S. (2019). Nanomaterials as fertilizers for improving plant mineral nutrition and environmental outcomes.

Environmental Science: Nano, 6(12), 3513-3524. https://doi.org/10.1039/C9EN00971J

Lira-Saldivar, R. H., Argüello, B. M., Villarreal, G. D. L. S., & Reyes, I. V. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta universitaria*, *28*(2), 9–24. https://doi.org/10.15174/au.2018.1575

Luna, J. S., Osorio, M. B. S., Galvan, D. S., Rodriguez, J. P., & Pelaez, S. F. (2015). Efectos de los fungicidas organofosforados y carbamatos en la salud de los escolares. *Revista Ciencia UNEMI*, 8(16), 62-67.

Nghia, L. T., Tung, H. T., Huy, N. P., Luan, V. Q., & Nhut, D. T. (2017). The effects of silver nanoparticles on growth of *Chrysanthemum morifolium* Ramat. cv." Jimba" in different cultural systems. *Vietnam Journal of Science and Technology*, *55*(4), 503-514. https://doi.org/10.15625/2525-2518/55/4/9322

Rautela, I., Dheer, P., Thapliyal, P., Shah, D., Joshi, M., Upadhyay, S., Gururani, P., Sinha, V. B., Gaurav, N. & Sharma, M. D. (2021). Current scenario and future perspectives of nanotechnology in sustainable agriculture and food production. *Plant Cell Biotechnol. Mol. Biol.*, 22(2021),99-121.

Rónavári, A., Igaz, N., Adamecz, D. I., Szerencsés, B., Molnar, C., Kónya, Z., & Pfeiffer, I. (2021). Green silver and gold nanoparticles: Biological synthesis approaches and potentials for biomedical applications. *Molecules*, 26(4), 844. https://doi.org/10.3390/molecules26040844

Saha, N., & Gupta, S. D. (2018). Promotion of shoot regeneration of Swertia chirata by biosynthesized silver nanoparticles and their involvement in ethylene interceptions and activation of antioxidant activity. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 134(2018), 289-300. https://doi.org/10.1007/s11240-018-1423-8

Salih, A. M., Al-Qurainy, F., Nadeem, M., Tarroum, M., Khan, S., Shaikhaldein, H. O., & Al-Hamoud, G. A. (2024). Biofabricated silver nanoparticles improved biomass, physiological and biochemical indices of strawberry (*Fragaria ananassa*) under closed cultivation conditions. *South African Journal of Botany*, 171(2024),780-787. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.06.045

Singh, H. (2015). Plant-nanoparticle interaction: An approach to improve agricultural practices and plant productivity. *International Journal of Pharmaceutical Science Invention*, 4(8), 25-40.

Singh, R. P., Handa, R., & Manchanda, G. (2020). Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of Controlled Release*, 329(2020),1234-1248. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.051

Sogvar, O. B., Koushesh-Saba, M., Emamifar, A., & Hallaj, R. (2016). Influence of nano-ZnO on microbial growth, bioactive content and postharvest quality of strawberries during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 35,(2016),168-176. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.05.005

Tung, H. T., Thuong, T. T., Cuong, D. M., Luan, V. Q., Hien, V. T., Hieu, T., ... & Nhut, D. T. (2021). Silver nanoparticles improved explant disinfection, in vitro growth, runner formation and limited ethylene accumulation during micropropagation of strawberry (Fragaria× ananassa). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, *145*(2), 393-403. https://doi.org/10.1007/s11240-021-02015-4

Valera Quiroz, M. D. R. (2017). Toxicidad del fungicida Kresoxim metil sobre siete bioindicadores de calidad ambiental. *The Biologist*, 16(2),299–321. https://doi.org/10.24039/rtb2018162259

Zahedi, S. M., Karimi, M., & Teixeira da Silva, J. A. (2020). The use of nanotechnology to increase quality and yield of fruit crops. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(1), 25-31. https://doi.org/10.1002/jsfa.10004

Referencia electronica

FAOSTAT. (2026). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Consultado En línea: http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx (07/07/2026)

SIAP. (2026). Servicio De Información Agroalimentaria y Pesquera. Consultado En línea: http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemi (07/07/2026)

Síntesis, caracterización y aplicación de nanomateriales a partir de espirulina como promotor de la germinación y crecimiento en cereales de interés económico del estado de Jalisco

Juan Pablo Viramontes Márquez[95], Gregorio Guadalupe Carbajal Arizaga[96], Nutan Prasad Rout

Resumen

Los hidróxidos dobles laminares (HDL) han despertado interés en el ámbito agrícola debido a su capacidad para actuar como sistemas de liberación controlada de compuestos bioactivos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de nanobiocompuestos basados en HDL de magnesio-aluminio y zinc-aluminio hibridados con un hidrolizado de *Arthrospira platensis* sobre la germinación y el desarrollo inicial de *Zea mays, Hordeum vulgare* y *Triticum aestivum*. Los materiales fueron sintetizados mediante coprecipitación y caracterizados previamente. Posteriormente, se realizaron ensayos in vitro para determinar las concentraciones óptimas de aplicación y pruebas ex vitro para validar su efecto bioestimulante. Los resultados mostraron que las concentraciones de 600 y 1000 ppm promovieron un mayor desarrollo radicular y aéreo, con incrementos de entre 15 y 45 % respecto al control, dependiendo de la especie evaluada. Asimismo, se observaron mejoras en la velocidad y eficiencia del proceso germinativo. En general, los tratamientos que incorporaron el hidrolizado de *A. platensis* mostraron una respuesta bioestimulante positiva de tipo hormética sobre el crecimiento inicial de las plántulas. Se concluye que estos nanobiocompuestos poseen potencial como nanobioestimulantes para aplicaciones agrícolas, por lo que representan una alternativa prometedora para el desarrollo de insumos más eficientes y sostenibles.

Palabras clave: nanobioestimulantes; hidróxidos dobles laminares; *Arthrospira platensis*.

Abstract

[95] Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco A.C, Unidad de Biotecnología Vegetal. Camino Arenero 1227, El Bajío, C.P. 45019, Zapopan, Jalisco, México. nutan@ciatej.mx, juan.viramontes8333@alumnos.udg.mx
[96] Departamento de Química, Universidad de Guadalajara. Blvd. Marcelino García Barragán 1421, C.P. 44430, Guadalajara, Jalisco, México

Layered double hydroxides (LDHs) have attracted increasing interest in agriculture due to their ability to act as controlled-release systems for bioactive compounds. The objective of this study was to evaluate the effect of nanobiocomposites based on magnesium-aluminum and zinc-aluminum LDHs hybridized with an *Arthrospira platensis* hydrolysate on the germination and early development of *Zea mays*, *Hordeum vulgare*, and *Triticum aestivum*. The materials were synthesized by coprecipitation and subsequently characterized. In vitro assays were performed to determine the optimal application concentrations, and ex vitro experiments were conducted to validate their biostimulant effect. The results showed that concentrations of 600 and 1000 ppm promoted greater root and shoot development, with increases ranging from 15 to 45% compared with the control, depending on the evaluated species. Improvements in germination rate and efficiency were also observed. In general, treatments containing the *A. platensis* hydrolysate exhibited a positive hormetic biostimulant response on early seedling growth. These findings indicate that the developed nanobiocomposites have potential as agricultural nanobiostimulants and represent a promising alternative for the development of more efficient and sustainable crop inputs.

Keywords: nanobiostimulants; layered double hydroxides; *Arthrospira platensis*.

Introducción

La agricultura enfrenta el reto de mantener la productividad necesaria para satisfacer la demanda creciente de alimentos, mientras disminuye la presión sobre los recursos naturales y se incrementa la resiliencia de los cultivos frente a factores ambientales adversos. En este contexto, el desarrollo de estrategias que mejoren la eficiencia en el uso de nutrientes y la tolerancia al estrés constituye una alternativa para avanzar hacia sistemas agrícolas más eficientes y sostenibles. Entre estas estrategias se encuentran los bioestimulantes vegetales, definidos como sustancias o microorganismos capaces de mejorar la eficiencia nutricional, la tolerancia al estrés abiótico y/o características de calidad de las plantas, independientemente de su contenido nutrimental (du Jardin, 2015).

Los bioestimulantes comprenden una amplia diversidad de sustancias de origen natural y microorganismos. Su aplicación puede modificar procesos fisiológicos y metabólicos relacionados con el crecimiento, el desarrollo radicular, la absorción y utilización de nutrientes y las respuestas antioxidantes frente al estrés. A diferencia de los fertilizantes, su función no depende exclusivamente del aporte de nutrientes, sino de la estimulación de procesos naturales de la planta (du Jardin, 2015).

Entre las fuentes emergentes de bioestimulantes destacan las microalgas y cianobacterias, debido a su capacidad para producir proteínas, aminoácidos, polisacáridos, pigmentos, ácidos grasos, antioxidantes y otros metabolitos con actividad biológica. Estos compuestos pueden favorecer procesos relacionados con la germinación, el crecimiento y la respuesta de las plantas ante condiciones adversas, posicionando a la biomasa microalgal como una fuente potencial de bioinsumos agrícolas (Ronga et al., 2019). En particular, *Arthrospira platensis*, conocida comercialmente como *Spirulina*, contiene diversos compuestos bioactivos y sus extractos han

mostrado efectos favorables durante el desarrollo temprano de cultivos y, en algunos casos, sobre el rendimiento agrícola (Shedeed et al., 2022, Costantino et al., 2014).

Sin embargo, la aplicación directa de extractos microalgales puede presentar limitaciones asociadas con la complejidad de sus matrices, estabilidad de los compuestos bioactivos y disponibilidad de estos en el sitio de acción. Por ello, la incorporación de estos compuestos en sistemas capaces de protegerlos y controlar su liberación representa una estrategia de interés para mejorar el aprovechamiento de bioestimulantes de origen biológico.

En este sentido, la nanotecnología agrícola ha permitido desarrollar materiales capaces de transportar, proteger y liberar de manera controlada nutrientes y moléculas bioactivas. Entre ellos destacan los hidróxidos dobles laminares (HDL), materiales cuya estructura se basa en láminas de hidróxidos metálicos con carga positiva, originada por la sustitución parcial de cationes divalentes por cationes trivalentes, y un espacio interlaminar ocupado por aniones y moléculas de agua. Esta configuración les confiere una elevada capacidad de intercambio e intercalación de especies aniónicas, permitiendo modificar sus propiedades y controlar la disponibilidad de las moléculas incorporadas (Martínez & Carbajal, 2012). De manera general, los HDL pueden representarse mediante la fórmula:

$$[\mathbf{M^{2+}}_{1-x}\mathbf{M^{3+}}_{x}(\mathbf{OH})_2]^{x+}(\mathbf{A^{n-}})_{x/n} \cdot \mathbf{mH_2O}$$

donde M^{2+} corresponde a un catión divalente, como Mg^{2+} o Zn^{2+}, M^{3+} a un catión trivalente, como Al^{3+}, y A^{n-} al anión presente en la región interlaminar. Estas propiedades, junto con su capacidad de intercambio iónico y liberación controlada, han favorecido su investigación como sistemas nanoestructurados para aplicaciones agrícolas (Chatterjee et al., 2019).

La composición de los HDL puede modificarse mediante diferentes combinaciones de cationes metálicos. Los sistemas basados en Mg/Al y Zn/Al presentan particular interés debido a sus propiedades estructurales y a la importancia agronómica de Mg y Zn (Viramontes Márquez, 2025). La posibilidad de utilizar estas matrices para incorporar compuestos bioactivos permite plantear una estrategia diferente a la aplicación convencional de extractos: combinar una fuente biológica de bioestimulación con una matriz nanoestructurada capaz de modular su disponibilidad (Singha Roy et al., 2022).

De esta manera, la integración de bioestimulantes derivados de microalgas y HDL representa una aproximación hacia el desarrollo de bioinsumos de nueva generación. La intercalación de un hidrolizado de *A. platensis* en matrices de Mg/Al y Zn/Al podría permitir obtener nanobiocompuestos en los que los componentes bioactivos de origen biológico se encuentren asociados con una estructura capaz de modificar su comportamiento fisicoquímico y potencialmente su disponibilidad para la planta. La caracterización de estos materiales resulta, por tanto, fundamental para relacionar sus propiedades estructurales y fisicoquímicas con su actividad biológica.

En este contexto, el objetivo de este trabajo fue sintetizar y caracterizar nanobiocompuestos de Mg/Al y Zn/Al intercalados con hidrolizado de *Arthrospira platensis*, y evaluar su efecto bioestimulante sobre la germinación y el crecimiento inicial de *Zea mays*, *Hordeum vulgare* y *Triticum aestivum*. Se planteó como hipótesis que la incorporación del hidrolizado de *A. platensis* en matrices de HDL permitiría obtener nanobiocompuestos con propiedades adecuadas para favorecer el desarrollo temprano de estos cultivos.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

La investigación se realizó durante 2024–2025 en la Unidad de Biotecnología Vegetal del Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco (CIATEJ, México) y en el Laboratorio de Materiales del Departamento de Química del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de Guadalajara.

Obtención del hidrolizado de *Arthrospira platensis*

El hidrolizado se obtuvo a partir de biomasa liofilizada de *Arthrospira platensis* mediante hidrólisis alcalina de acuerdo con la Patente IMPI No. 420966. Brevemente, 20 g de biomasa se suspendieron en una solución alcalina de KOH al 3 % y se mantuvieron a 80–90 °C durante 60 min bajo agitación constante. Posteriormente, el material fue filtrado y sometido a una segunda etapa de hidrólisis. Los sobrenadantes obtenidos se combinaron, ajustando el
volumen final a 1 L con agua destilada y el pH a 6.0.

Síntesis de HDLs y biocompositos

Los hidróxidos dobles laminares (HDL) de Mg/Al y Zn/Al fueron sintetizados mediante coprecipitación siguiendo la metodología descrita por Martínez y Carbajal (2012). Se emplearon nitrato de magnesio hexahidratado, nitrato de zinc hexahidratado y nitrato de aluminio nonahidratado (Sigma-Aldrich, EE. UU.). Las sales metálicas se disolvieron en agua desionizada y el pH se ajustó gradualmente a 8.5 mediante la adición de NaOH 1 M (Sigma-Aldrich, EE. UU.) bajo agitación constante. Las suspensiones se mantuvieron en agitación durante una hora a temperatura ambiente.

Una vez sintetizados y lavados los HDL, se incorporó el hidrolizado de *A. platensis*

mediante contacto directo entre el material y el extracto, favoreciendo la interacción de compuestos bioactivos como aminoácidos, péptidos, polisacáridos y pigmentos con la matriz laminar. Los materiales obtenidos se denominaron Mg/Al+B y Zn/Al+B.

Caracterización de HDLs y biocompositos

Previamente se caracterizó el hidrolizado de *Arthrospira platensis* y posteriormente los materiales HDL-Mg/Al, HDL-Zn/Al, HDL-Mg/Al+B y HDL-Zn/Al+B. Para todos los análisis, las muestras se secaron a 50 °C y se molieron hasta obtener un polvo fino. El tamaño promedio de cristalito se estimó mediante la ecuación de Scherrer.

La estructura cristalina de los materiales se evaluó mediante difracción de rayos X (DRX) en el Laboratorio de Materiales del CUCEI, Universidad de Guadalajara, utilizando un difractómetro Siemens D500 (Alemania) en configuración Bragg–Brentano (θ/2θ) con radiación Cu Kα. Los difractogramas obtenidos fueron procesados mediante el software Origin para la identificación de fases cristalinas.

Posteriormentese estimó el tamaño promedio de cristalito de los materiales sintetizados a partir de los patrones obtenidos de difracción de rayos X en la reflexión 003 mediante la ecuación de Scherrer:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta}$$

donde es el tamaño promedio del cristalito (nm), es el factor de forma del cristalito (0.9), es la longitud de onda de la radiación utilizada (Cu Kα = 0.15406 nm), corresponde al ancho a la mitad de la altura máxima del pico de difracción (FWHM), expresado en radianes, y es el ángulo de Bragg correspondiente al pico analizado. El cálculo se realizó a partir de los picos de difracción característicos de cada material.

Los grupos funcionales presentes en el hidrolizado y en los materiales sintetizados se determinaron mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) utilizando un espectrofotómetro Agilent Cary 630 (Estados Unidos), en un intervalo espectral de 4000–650 cm^{-1} mediante reflectancia total atenuada (ATR).

El tamaño hidrodinámico de partícula se determinó mediante dispersión dinámica de luz

(DLS) empleando un equipo Zetasizer Nano ZS90 (Malvern Panalytical, Reino Unido) en la Unidad de Tecnología Alimentaria del CIATEJ Zapopan.

La composición elemental de los materiales se analizó mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM) JEOL JSM-6610LV (Japón) en el Instituto Transdisciplinar de Investigación y Servicios (ITRANS) del CUCEI. Previamente, las muestras fueron recubiertas con oro durante 30 s y analizadas a una magnificación de 2500×.

Material vegetal

Las semillas de maíz utilizadas en los experimentos fueron obtenidas de FILMEX Genética, Top Seed Genetics, S.P.R. de R.I. Se seleccionó el híbrido FM-DORADO-M debido a su doble propósito, destinado tanto a la producción de grano como de forraje, así como por presentar un ciclo de crecimiento intermedio-temprano. Asimismo, las semillas de cebada y trigo fueron adquiridas a productores locales ("Semillas y Pastos de Jalisco"). Antes de su utilización, todas las semillas fueron desinfectadas mediante inmersión en una solución de detergente durante 5 minutos, seguida de una inmersión en hipoclorito de sodio al 1 % durante 1.5 minutos. Posteriormente, las semillas fueron enjuagadas cuatro veces con agua destilada estéril durante 1.5 minutos en cada ocasión.

Ensayo de germinación y crecimiento in vitro

Para el *seed priming*, se colocaron 25 semillas de cada especie en tubos Falcon con 40 mL de la solución correspondiente y se mantuvieron en inmersión durante 24 h. Posteriormente, las semillas se transfirieron a recipientes PET de 1 L previamente esterilizados, con cinco capas de papel absorbente humedecido con 10 mL de agua destilada estéril. Se colocaron 10 semillas por recipiente, con dos réplicas por tratamiento. Se evaluaron 13 tratamientos, correspondientes a HDL-Mg/Al y HDL-Zn/Al a 600, 1000 y 2000 ppm, con y sin hidrolizado de *Spirulina*, además de un control absoluto con agua. Como variables agronómicas se determinaron la longitud del tallo y de la radícula.

Se utilizó un diseño completamente al azar y los resultados se analizaron mediante ANOVA de dos vías, considerando el tipo de nanomaterial, la concentración y su interacción con la presencia de *Spirulina*. Las diferencias entre tratamientos se determinaron mediante la prueba de Fisher LSD (95 % de confianza) utilizando Statgraphics Centurion.

Ensayo de germinación y crecimiento ex vitro

Los experimentos se realizaron bajo condiciones controladas de invernadero, utilizando bandejas de 96 cavidades previamente desinfectadas, con sustrato comercial SunShine GrowMix 3 y perlita (3:1 v/v). A partir de los resultados *in vitro*, se seleccionaron las concentraciones de 600 y 1000 ppm para los HDL-Mg/Al y HDL-Zn/Al, con y sin hidrolizado de *Arthrospira platensis*, además de un control absoluto con agua, obteniendo 9 tratamientos. Se establecieron 40 plántulas por tratamiento, bajo condiciones de 25 ± 2 °C, 60 ± 10 % de humedad relativa y fotoperiodo de 16/8 h luz/oscuridad. El experimento siguió un diseño completamente al azar con dos réplicas por tratamiento.

Se evaluaron porcentaje, velocidad y tiempo de germinación, tiempo medio de germinación (MGT), longitud del tallo, longitud de la radícula y peso fresco de las plántulas. Los datos se analizaron mediante ANOVA de dos vías para determinar los efectos del tipo de HDL, concentración, presencia del alga y sus interacciones. El control absoluto se analizó por separado y las comparaciones múltiples se realizaron mediante Fisher LSD (95 % de confianza), utilizando Statgraphics Centurion.

Resultados y discusión

Síntesis de HDLs y biocompositos

Durante la síntesis de los LDHs de tipo Mg/Al y Zn/Al, se obtuvieron rendimientos en peso fresco de 5.76 g para el LDH-Mg/Al y 6.21 gramos para el LDH-Zn/Al. (Cuadro 1). Estos resultados se obtuvieron a partir de la coprecipitación controlada de nitrato de magnesio con nitrato de aluminio, y de nitrato de zinc con nitrato de aluminio, respectivamente, empleando condiciones alcalinas estables. El pH inicial de las soluciones precursoras se encontraba entre 3.3 y 3.6, incrementándose hasta aproximadamente 8.6–8.8 al momento de la alcalinización, y estabilizándose en valores ligeramente alcalinos al finalizar el proceso (pH final de 7.12 para Mg/Al y 7.30 para Zn/Al). Estos valores indican que el entorno de síntesis permitió una adecuada precipitación de los compuestos laminares. El rendimiento en peso sugiere una formación eficiente de los LDH, y la ausencia de aditivos orgánicos o extractos garantiza que el producto final es de naturaleza puramente inorgánica, lo que representa una base confiable para comparaciones posteriores con materiales hibridados.

Para los cálculos estequiométricos se tomó como base las composiciones ideales $Mg_3Al(OH)_8NO_3$ en el sistema magnesio–aluminio (razón molar Mg:Al = 3:1) y $Zn_{2.5}Al(OH)_7NO_3$ en el sistema zinc–aluminio (razón molar Zn:Al = 2.5:1). El procedimiento de cálculo consistió en tomar como base un gramo de hidrotalcita (LDH), a

partir del cual se determinó el número de moles de la fórmula estructural y, posteriormente, los moles correspondientes de cada catión metálico según la razón molar establecida. Con ello se calcularon las masas necesarias de cada sal precursora, empleando sus masas molares correspondientes.

Cuadro 1. Masas utilizadas para la síntesis de 1g de LDH, mL de hidrolizado por síntesis, pH
Registrado y peso fresco obtenido como producto final.

Mg/Al	Nitrato de magnesio 2.5816	Nitrato de aluminio 1.2593	---	3.64	8.65	7.12	5.76
Mg/Al + B	Nitrato de magnesio 2.5816	Nitro de aluminio 1.2593	410	3.75	8.89	7.32	9.32
Zn/Al	Nitrato de zinc 2.0024	Nitrato de aluminio 1.0100	---	3.35	8.84	7.30	6.21
Zn/Al + B	Nitrato de zinc 2.0024	Nitrato de aluminio 1.0100	423	3.51	8.50	7.15	10.82

El análisis mediante difracción de rayos X (DRX) permitió evaluar la estructura cristalina de los LDH sintetizados y los materiales posteriores a la adición del hidrolizado. El tamaño de cristalito estimado mediante la ecuación de Scherrer para el LDH puro de Mg/Al fue de 8.89nm. Tras la incorporación del hidrolizado de *Spirulina platensis*, el tamaño de cristalito
disminuyó a 2.51 nm, lo que representa una reducción del 72%. Adicionalmente, se observó
un corrimiento significativo del pico (003) desde 2θ = 10.08° en el LDH puro hasta 2θ = 5.88° en el biocompósito (Mg/Al+H), lo que se traduce en un aumento de la distancia interlaminar de 0.88 nm a 1.50 nm (Cuadro 2). Estos resultados indican la ocurrencia de dos fenómenos simultáneos: (i) la intercalación de moléculas del hidrolizado entre las láminas del LDH, evidenciada por el aumento del espaciado basal; y (ii) la adsorción superficial de las mismas, evidenciada por la marcada reducción en el tamaño de cristalito. Ambos mecanismos contribuyen a la formación de un verdadero híbrido orgánico-inorgánico.

Cuadro 2. Datos obtenidos del perfil de difracción de rayos X (DRX) y tamaño de cristalito del LDH puro y del biocompósito LDH-hidrolizado de *Spirulina platensis.*

LDH Mg/Al	10.08	0.88	0.89	8.89
LDH Mg/Al+H	5.88	1.50	3.17	2.51
LDH Zn/Al	11.46	0.77	0.64	16.7
LDH Zn/Al+H	7.04	1.25	0.4	21.3

Caracterización de HDLs y biocompositos

El difractograma de referencia de la hidrotalcita (Figura 1) muestra las reflexiones características de una estructura tipo HDL, utilizadas como patrón para comparar los materiales sintetizados. El Mg/Al (Figura 2A) presentó reflexiones alrededor de 2θ ≈ 11°, 23° y 34°, correspondientes a los planos (003), (006) y (012), con parámetros de red c = 22.8 Å y a = 3.05 Å, confirmando la formación de una estructura tipo LDH con buena cristalinidad. Tras la incorporación del hidrolizado (Mg/Al+H, Figura 2B), apareció una nueva reflexión a 2θ ≈ 5.9°, consistente con un incremento de la distancia interlaminar por la incorporación de componentes orgánicos del hidrolizado. Además, la disminución de la intensidad y el ensanchamiento de las reflexiones indicaron una reducción del orden cristalino.

De manera similar, el Zn/Al (Figura 2C) presentó las reflexiones características de una estructura LDH bien cristalizada. Después de incorporar el hidrolizado (Zn/Al+H, Figura 2D), apareció una reflexión prominente a 2θ ≈ 5.8°, atribuida a la expansión del espacio interlaminar, acompañada de una disminución de la intensidad y un ensanchamiento de las reflexiones de mayor ángulo, lo que evidenció una mayor reducción de la cristalinidad respecto al sistema Mg/Al.

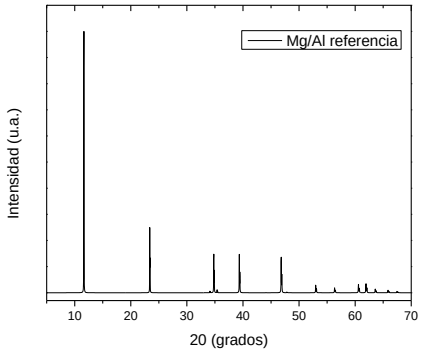


Figura 1. Difractograma de hidrotalcita (LDH puro y de referencia) mostrando la ausencia de fases secundarias o contaminantes.

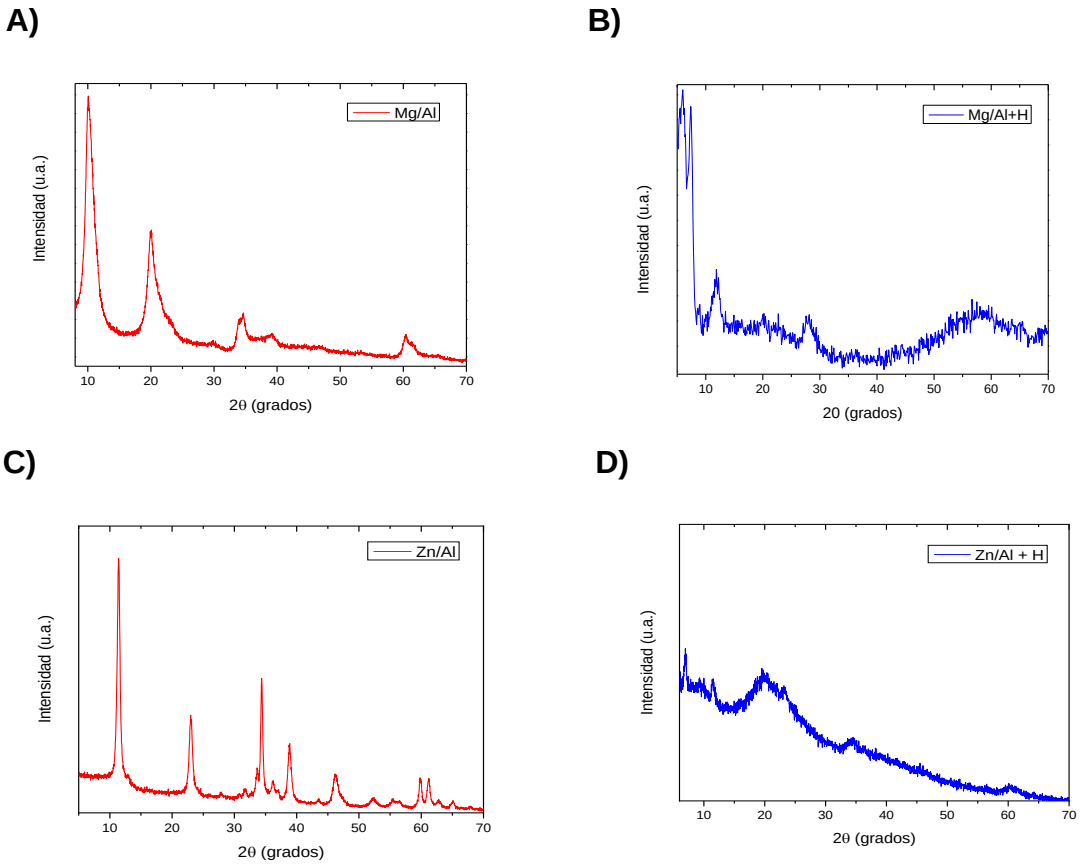
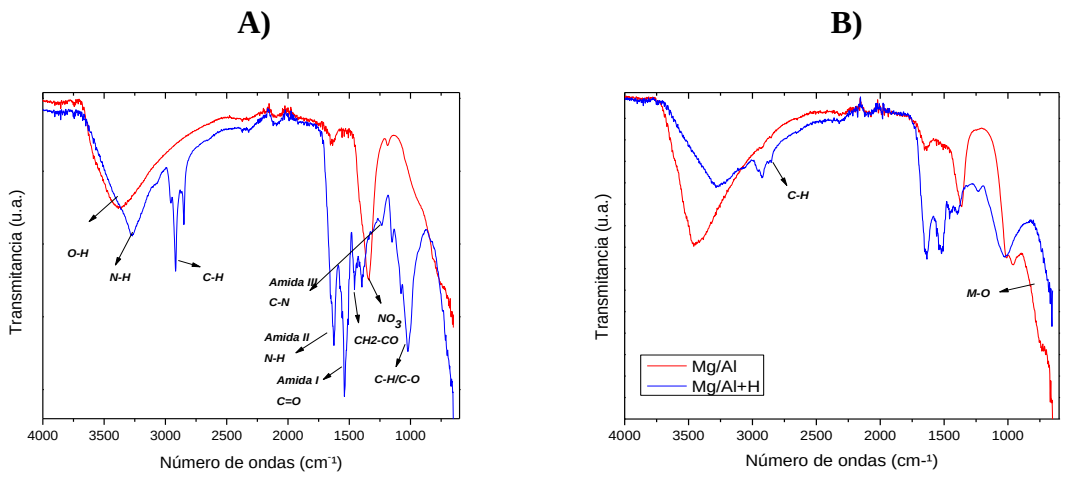


Figura 2. Difractogramas de LDH. A) Mg/Al puro, B) Mg/Al con el hidrolizado, C) Zn/Al puro y D) Zn/Al con el hidrolizado.

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) aportó información sobre las interacciones químicas establecidas entre el LDH y el hidrolizado (Figura 3). Se observa en la figura 3A sobre la región de 3500–3300 cm^{-1} bandas anchas correspondientes a vibraciones en grupos hidroxilo (O-H), también presentes en el agua interlaminar de los LDH, cuya intensidad fue mayor en los materiales hibridados con extracto. Asimismo, en la región de 1650–1550 cm^{-1} se registraron señales atribuibles a las vibraciones el enlace (C=O) en carbonilos de amida I y II, relacionadas con proteínas y péptidos presentes en el extracto de *S. platensis*. La mayor intensidad de estas señales en los materiales LDH+H (en color azul) confirma la incorporación de compuestos nitrogenados en la estructura laminar. Finalmente, en la región de 1000–900 cm^{-1} se observaron señales asociadas a vibraciones C-H y C-O (probablemente enlace glicosídico) y debajo de 900 cm^{-1} aparecen vibraciones M–O y M–OH, características de los enlaces metálicos de la matriz (presentes en la figura 3A y 3B), que en el caso de los LDH con hidrolizado presentaron ligeros desplazamientos, lo cual sugiere modificaciones estructurales debidas a la interacción entre los grupos funcionales orgánicos y la red laminar.



C)

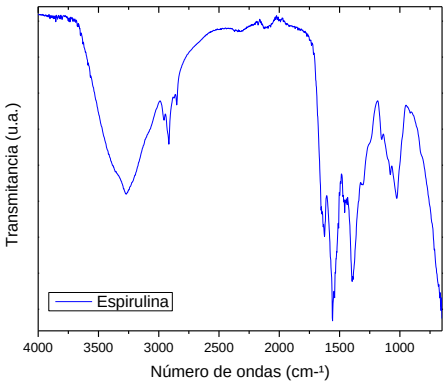


Figura 3. Espectros de FTIR de los LDH sintetizados puros y con el hidrolizado. A) LDH de estructura Mg/Al y Mg/Al+H. B) Zn/Al y Zn/Al+H, así como los grupos funcionales identificados.

Los análisis de DLS permitieron evaluar la distribución de tamaños y la estabilidad coloidal de los LDH (Figura 4). Los LDHs sintetizados en su forma pura mostraron índices de polidispersidad (PDI) relativamente bajos, con valores de 0.194 en el caso de Zn/Al y 0.351 en Mg/Al, lo que indica una distribución de tamaños más homogénea y controlada. En contraste, los LDH funcionalizados con extracto (Zn/Al+H y Mg/Al+H) presentaron PDI más elevados, de 0.381 y 0.554 respectivamente, lo que refleja una mayor variabilidad en el tamaño de partícula. Este incremento puede estar relacionado con la incorporación de biomoléculas heterogéneas como proteínas, polisacáridos y pigmentos, que introducen irregularidades en el crecimiento y dispersión de las partículas. No obstante, el extracto también actuó como agente surfactante, reduciendo la tendencia de los LDH a formar agregados, lo cual sugiere que las macromoléculas del hidrolizado contribuyen a mantener la dispersión de las partículas mediante interacciones superficiales. Estos hallazgos son consistentes con lo reportado para nanomateriales estabilizados con biopolímeros, en los que la diversidad de moléculas intercaladas incrementa la heterogeneidad del sistema, pero a la vez mejora su estabilidad coloidal y potencial de aplicación (Rodriguez-Loya et al., 2024).

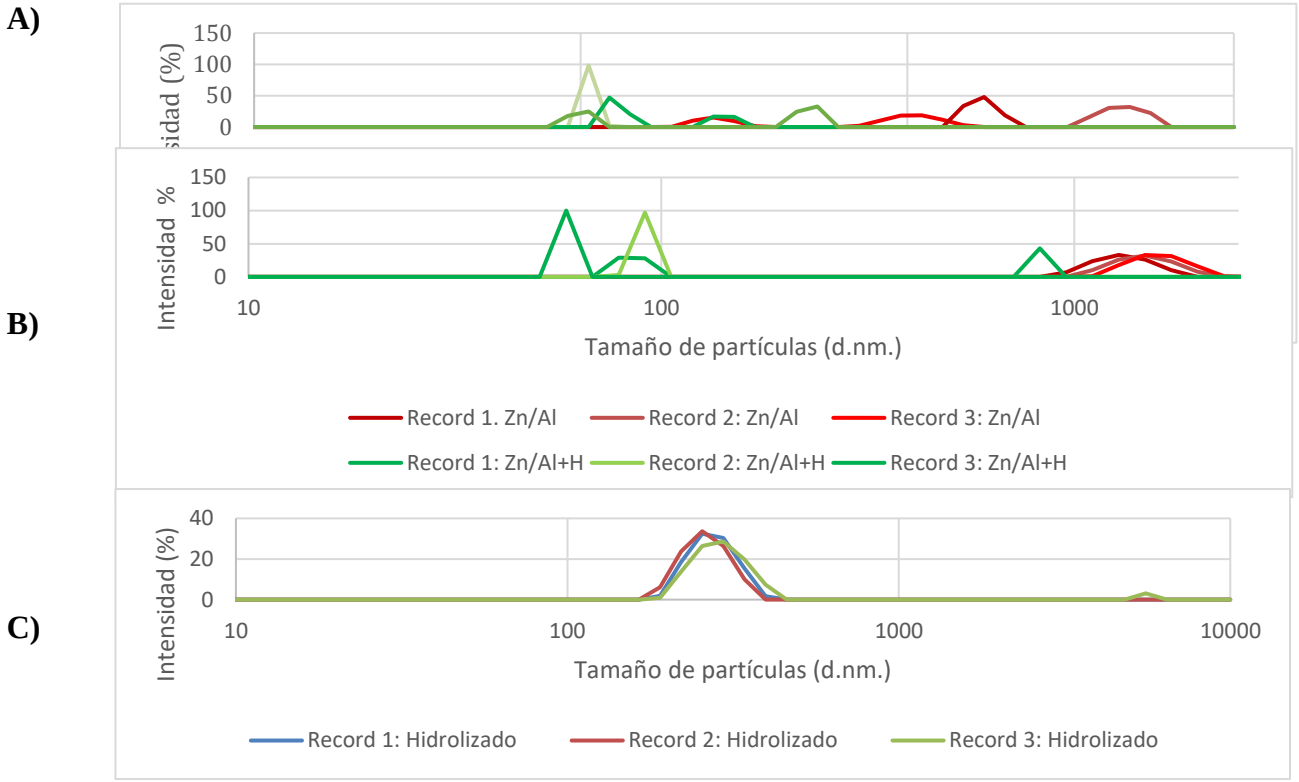


Figura 4. Gráficos de dispersión del tamaño de partícula de las muestras de LDH puros y con el hidrolizado. A) Hidrolizado de Spirulina platensis, B) LDH Zn/Al y Zn/Al+H, C) LDH Mg/Al y Mg/Al+H.

La caracterización mediante EDS permitió evaluar los cambios en la composición elemental de los materiales tras la incorporación del hidrolizado de *A. platensis* (Figura 5). En el sistema Mg/Al (Figura 5A), el material sin hidrolizado presentó principalmente Mg, Al y O, mientras que después de la incorporación del hidrolizado se observó un incremento en las señales de C y N. De manera similar, en el sistema Zn/Al (Figura 5B), el material sin hidrolizado mostró principalmente Zn, Al y O, mientras que el material funcionalizado presentó un aumento en C y N. Estos cambios son consistentes con la incorporación de la fracción orgánica proveniente del hidrolizado, cuyos componentes contienen proteínas, aminoácidos, carbohidratos y otros metabolitos de la biomasa algal. La presencia de C y N en mayor proporción en los materiales funcionalizados, respecto a los HDL sin hidrolizado, constituye evidencia de la incorporación de componentes orgánicos a ambas matrices inorgánicas. En conjunto, los resultados de EDS respaldan la obtención de materiales híbridos que combinan

la matriz inorgánica de los HDL con componentes derivados de *A. platensis*.

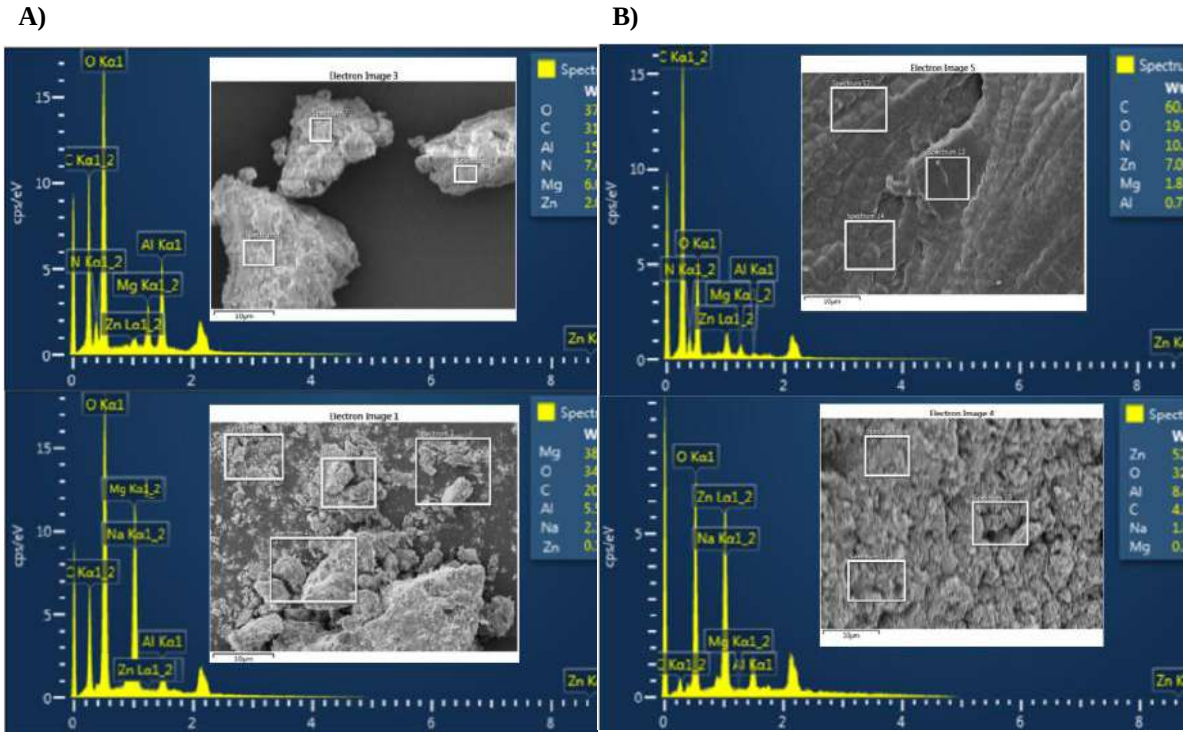


Figura 5. Espectros EDS y composición elemental de los materiales. A) LDH-Mg/Al y Mg/Al+H. B) LDH-Zn/Al y Zn/Al+H. Los segmentos analizados se indican en el centro de cada micrografía.

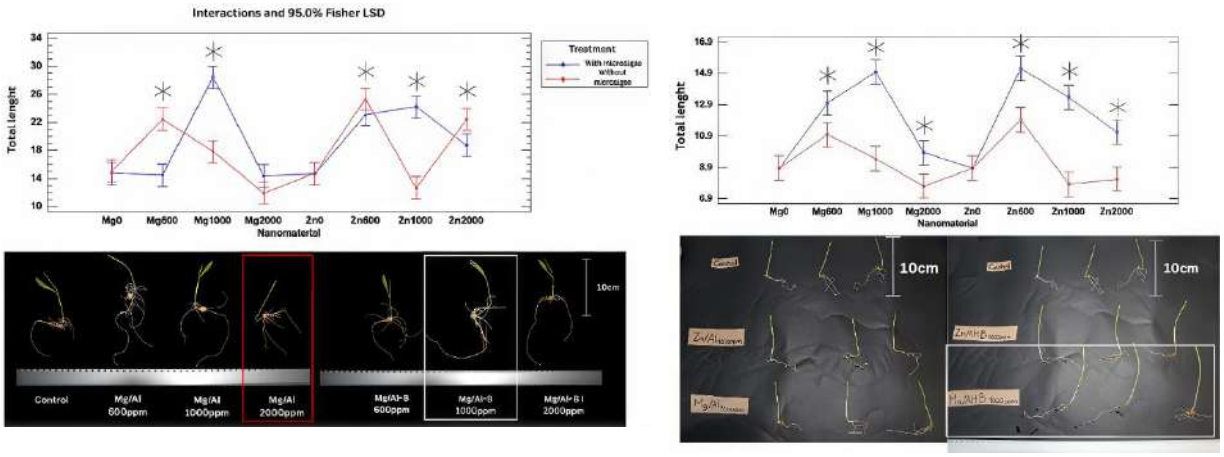
Ensayo de germinación y crecimiento in vitro

Los ensayos realizados con maíz, cebada y trigo mostraron que la incorporación del hidrolizado
de *Arthrospira platensis* generalmente mejoró la germinación y el crecimiento inicial respecto a los HDL sin biostimulante (Figura 6). Los mejores resultados se observaron principalmente a 600 y 1000 ppm, mientras que a 2000 ppm la respuesta disminuyó en la mayoría de los tratamientos, evidenciando un efecto dependiente de la dosis.

En maíz, Mg/Al+B a 1000 ppm alcanzó la mayor longitud de tallo (29 cm), superando al control

y al material sin hidrolizado. En cebada, Mg/Al+B y Zn/Al+B a 1000 ppm alcanzaron aproximadamente 15 cm, frente a 9 cm en el control. En trigo también se observó un mejor desempeño de los tratamientos funcionalizados, particularmente a 600 y 1000 ppm. Estos resultados sugieren que los compuestos bioactivos de *A. platensis*, combinados con las propiedades de los HDL, pueden favorecer el desarrollo inicial de las plántulas. La disminución observada a 2000 ppm es consistente con una posible respuesta hormética, en la que concentraciones intermedias estimulan el crecimiento y dosis elevadas pueden generar efectos adversos.

A) **B)**



C)

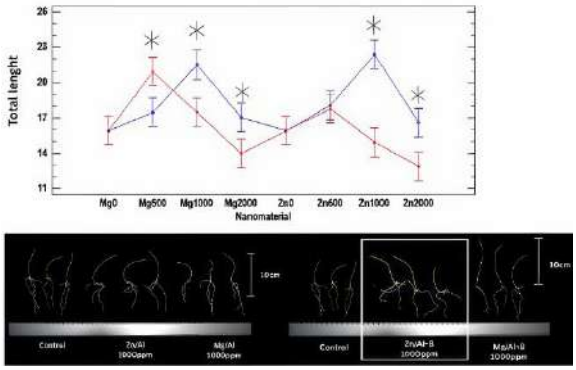


Figura 6. Gráficas de interacción del efecto de los tratamientos in vitro en A) maíz, B) cebada y C) trigo.

Ensayo de germinación y crecimiento ex vitro

En los tres cultivos se obtuvieron altos porcentajes finales de germinación, aunque las principales diferencias se observaron en la velocidad y uniformidad de emergencia. Los tratamientos con HDL + *A. platensis* mostraron, en general, mejores resultados que los tratamientos individuales (Figuras 7A, 7B y 7C). En maíz, Mg/Al+B a 1000 ppm presentó un tiempo medio de germinación de aproximadamente 3.5 días, frente a más de 5 días en el control. En cebada, este tratamiento alcanzó 3.48 días, mientras que el control presentó 5.28 días. En trigo se observó igualmente una emergencia más rápida y uniforme, especialmente a 600 y 1000 ppm. El crecimiento total de las plántulas confirmó la tendencia observada en la germinación. Mientras que los HDL sin hidrolizado mostraron sus mejores respuestas principalmente a 600 ppm, los tratamientos funcionalizados presentaron un mejor desempeño a 1000 ppm, destacando Mg/Al+B por su efecto sobre el crecimiento radicular y total. Las plántulas tratadas con HDL + *A. platensis* también mostraron raíces primarias más largas y mayor desarrollo lateral, lo que podría favorecer la exploración del sustrato y la adquisición de agua y nutrientes.

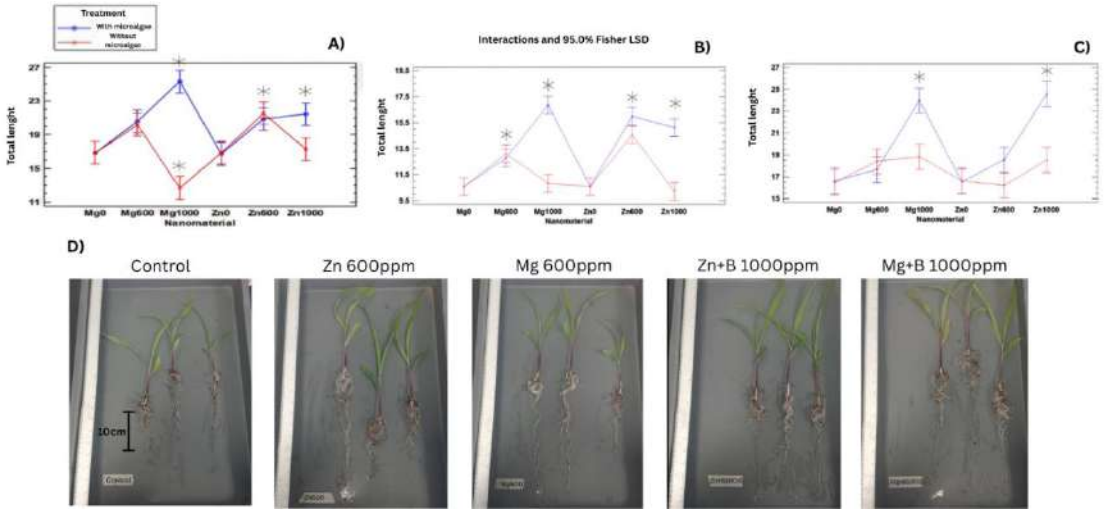


Figura 7. Gráficas de interacción del efecto de los tratamientos ex vitro en A) maíz, B) cebada y C) trigo.

El peso fresco mostró incrementos particularmente importantes a 1000 ppm en presencia del hidrolizado, con respuestas superiores a las observadas a 600 ppm en los tres cultivos. Estos resultados son consistentes con el mayor crecimiento observado y podrían estar relacionados

con una mayor disponibilidad de nutrientes y con la acción de los compuestos bioactivos de *A. platensis*.

Los resultados evidencian que la hibridación de los HDL con *A. platensis* puede potenciar su efecto bioestimulante, con respuestas más favorables entre 600 y 1000 ppm y una reducción del efecto a concentraciones elevadas. La formulación Mg/Al+B a 1000 ppm presentó una de las respuestas más consistentes entre los cultivos evaluados. No obstante, debido a que en este estudio no se determinó la cinética de liberación del hidrolizado, los resultados no permiten atribuir directamente los efectos a un mecanismo de liberación controlada. Se requieren estudios posteriores en condiciones de campo para validar su eficacia agronómica y evaluar su seguridad ambiental.

Conclusiones

Los nanobiocompuestos HDL-Mg/Al y HDL-Zn/Al funcionalizados con *Arthrospira platensis* favorecieron la germinación y el crecimiento inicial de maíz, cebada y trigo, con mejores respuestas principalmente entre 600 y 1000 ppm. Se observó un efecto hormético, caracterizado por estimulación a concentraciones intermedias y disminución de la respuesta a 2000 ppm. El tratamiento Mg/Al+B a 1000 ppm mostró el desempeño más consistente entre los cultivos. En conjunto, los resultados respaldan el potencial de estos materiales como nanobioestimulantes de nueva generación, aunque se requieren estudios adicionales bajo condiciones de campo para validar su eficacia y seguridad.

Literatura citada

Chatterjee, A., Bharadiya, P., & Hansora, D. (2019). Layered double hydroxide based bionanocomposites. *Applied Clay Science*, *177*, 19–36. https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.04.022

Costantino, U., Vivani, R., Bastianini, M., Costantino, F., & Nocchetti, M. (2014). Ion exchange and intercalation properties of layered double hydroxides towards halide anions. *Dalton Transactions*, *43*(31), 11931–11939. https://doi.org/10.1039/C4DT00620H

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

Martínez, D. R., & Carbajal Arízaga, G. G. (2012). Hidróxidos dobles laminares: arcillas sintéticas con aplicaciones en nanotecnología. *Avances en Química*, *7*(1), 87–99.

Ronga, D., Biazzi, E., Parati, K., Carminati, D., Carminati, E., & Tava, A. (2019). Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions. *Agronomy*, *9*(4), 192. https://doi.org/10.3390/agronomy9040192

Shedeed, Z. A., Gheda, S., Elsanadily, S., Alharbi, K., & Osman, M. E. H. (2022). Spirulina platensis biofertilization for enhancing growth, photosynthetic capacity and yield of *Lupinus luteus*. *Agriculture*, *12*(6), 781. https://doi.org/10.3390/agriculture12060781

Singha Roy, A., Kesavan Pillai, S., & Sinha Ray, S. (2022). Layered double hydroxides for sustainable agriculture and environment: An overview. *ACS Omega*, *7*(24), 20428–20440. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01405

Singha Roy, A., Kesavan Pillai, S., & Sinha Ray, S. (2023). A comparison of nitrate release from Zn/Al-, Mg/Al-, and Mg–Zn/Al layered double hydroxides and composite beads: Utilization as slow-release fertilizers. *ACS Omega*, *8*(9), 8427–8440. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c07395

Viramontes Márquez, J. P. (2025). *Síntesis, caracterización y aplicación de nanomateriales a partir de espirulina como promotor de la germinación y crecimiento en cereales de interés económico del estado de Jalisco* [Tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara]. ResearchGate. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17866.12483