UANL

FA

LXV

CICLO DE SEMINARIOS DE POSGRADO - OTOÑO - 2026



MEMORIAS

Doctorado en Ciencias Agrícolas

VISIÓN UANL 2040

30 de noviembre y 01 de diciembre de 2026 / 8:30 horas
Biblioteca de Ciencias Agropecuarias y Biológicas
Aula Usos Múltiples, Facultad de Agronomía
Campus de Ciencias Agropecuarias UANL

La excelencia por principio la educación como instrumento

DIRECTORIO

Dr.Med. Santos Guzmán López

Rector

M.C. Carlos Alberto Hernández Martínez

Director

Ph.D. Francisco Zavala García

Subdirector de Posgrado e Investigación

Dra. Nelly Cristina Ramírez Grimaldo

Secretaria de Posgrado e Investigación

COORDINADORES DE SEMINARIOS

Dr. Luis Enrique Espinoza Orozco

Dra. Ma. Del Carmen Ojeda Zacarías

Ph.D. Alejandro Isabel Luna Maldonado

Dr. Victor Eustorgio Aguirre Arzola

PRESENTACIÓN

La Subdirección de Posgrado e Investigación de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (FAUANL), organiza el LXV Ciclo de Seminarios de Posgrado e Investigación. En este Ciclo de Seminarios, los estudiantes de los programas educativos de Doctorado en Ciencias Agrícolas, Maestría en Ciencias en Producción Agrícola, Maestría en Ciencias con Orientación en: a) Ingeniería en Biosistemas y b) Ingeniería en Industrias Alimentarias, presentan sus avances de investigación ante especialistas externos invitados, evaluadores internos, comunidad estudiantil y docentes de la FAUANL.

Durante las ponencias, los ponentes reciben opiniones y sugerencias de los evaluadores y asistentes en general, sobre el desarrollo de sus tesis, permitiéndoles enriquecer sus trabajos de investigación, impactando positivamente en la calidad y el avance de sus manuscritos de tesis.

Estos eventos académicos, a través de su historia, han sido de gran beneficio para que los estudiantes cumplan en tiempo y forma su titulación y la difusión de sus resultados a través de artículos en revistas científicas de circulación nacional e internacional, mejorando así la eficiencia terminal exigida por el Sistema Nacional de Posgrados (SNP) / SECIHTI. Además, han representado la oportunidad para dar seguimiento al desarrollo de los programas educativos de los estudiantes y han sido una de las fortalezas de nuestros programas de posgrado para mantener su calidad, permitiendo alcanzar y conservar su reconocimiento en el SNP.

En este LXV Ciclo de Seminarios de Posgrado e Investigación, programado para los días 30 de noviembre y 01 de diciembre de 2026, se expondrán 40 trabajos de avances de investigación, además de dos conferencias magistrales por parte de externos.

Es importante agradecer a los Coordinadores del LXV Ciclo de Seminarios de Posgrado y al personal de la Subdirección de Posgrado e Investigación, por la organización del evento, así como también a los estudiantes de posgrado, asesores y comités particulares de tesis por su compromiso en la elaboración y entrega oportuna de los artículos de investigación para que este ciclo de seminarios pudiera realizarse.

Atentamente

Scientia Agricolis Vita

Ph.D. Francisco Zavala García
Subdirector de Posgrado e Investigación

Dra. Nelly Cristina Ramírez Grimaldo
Secretaria de Posgrado e Investigación

Dr. Luis Enrique Espinoza Orozco
Coordinador de Seminarios del P.E.
Doctorado en Ciencias Agrícolas

Dra. Ma. Del Carmen Ojeda Zacarías
Coordinadora de Seminarios del P.E.
Maestría en Ciencias en Producción Agrícola

Ph.D. Alejandro Isabel Luna Maldonado
Coordinador de Seminarios del P.E.
Maestría en Ciencias con orientación en Ingeniería en Biosistemas

Dr. Victor Eustorgio Aguirre Arzola
Coordinador de Seminarios del P.E.
Maestría en Ciencias con orientación en Ingeniería en Industrias Alimentarias

El contenido de los escritos en esta Memoria es responsabilidad de los autores.

PROGRAMA EDUCATIVO DE

DOCTORADO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

PRIMER SEMESTRE

Valorización sostenible de residuos agrícolas mediante pirólisis integrada con captura biológica de CO_2 y aplicación de biocarbón en sistemas suelo–planta
Jesús Alberto Lara-Reyes; Celestino García-Gómez; Adriana Pacheco-Moscoa; Alejandro Isabel Luna-Maldonado; Lizangela Guerra-Fuentes; Luis Martín Torres-Treviño; Carlos Alberto Garza-Alonso **7**

SEGUNDO SEMESTRE

Control de fitopatógenos del pimiento (*Capsicum annuum* L) mediante emulsiones de aceites esenciales
José Macario Padilla-Garza; Romeo Rojas-Molina; Adriana Gutierrez-Díez; Nancy del Pilar Medina-Herrera; Julia Mariana Márquez-Reyes; Raúl Rodríguez-Guerra; Guillermo Cristian Martínez-Ávila **17**

Diseño preliminar de una cámara térmica para la simulación de estrés abiótico
Zayd Eliud Rangel-Nava; Héctor Flores-Breceda; Sugey Ramona Sinagawa-García; Daniela Saraí Rico-Costilla; Urbano Luna Maldonado; Alejandro Isabel Luna-Maldonado **28**

TERCER SEMESTRE

Cuantificación de minerales, oxalatos y estandarización de un prototipo digestivo *in vitro* para harina de nopal cultivar Villanueva
Mayra Gómez-Alejo; Rigoberto E. Vázquez-Alvarado; Emilio Olivares-Sáen[1]; Alejandro Isabel Luna-Maldonado; Carlos Alberto Garza-Alonso; Aurora de Jesús Garza-Juárez; Perla Giovanna Silva-Flores ... **39**

Análisis de niveles tecnológicos para fortalecer la resiliencia de los sistemas citrícolas de Nuevo León
Nestor Magdaleno Montoya-Pineda; Alejandro Isabel Luna-Maldonado; Mario Alberto Méndez-Dorado; Osorio Hernández-Eduardo; Héctor Flores-Breceda; Celestino García-Gómez **46**

CUARTO SEMESTRE

Evaluación del efecto de la escala de entrenamiento espacial en la detección de árboles basada en UAV mediante aprendizaje profundo
Gilbert Fresh López-López; Alejandro Isabel Luna-Maldonado; Tsuyoshi Kajisa; Héctor Flores-Breceda; Julia Mariana Márquez-Reyes; Moisés Hinojosa-Rivera; Hugo Gutiérrez-Flores..... **56**

Multi-agentes LLM para el control de riego y ventilación en plántulas de chile jalapeño
Pedro Jesús Camarena-Martínez; Guillermo Cristian Guadalupe Martínez-Ávila; Romeo Rojas-Molina; Adriana Gutiérrez-Díez; Salvador Tututi-Ávila; Nancy Medina-Herrera **67**

QUINTO SEMESTRE

Capacidad depredadora de dos especies de Coccinélidos sobre mosquita blanca *Trialeurodes vaporariorum* (Hemíptera: Aleyrodidae)
Abigail Esmeralda Aguilar-Rocha; Lidia Rosaura Salas-Cruz; Orquídea Pérez-González; Laiju Kuzhuppillymyal-Prabhakarankutty; Emilio Olivares-Sáenz; Miguel Ángel Dector-Carrillo **76**

Caracterización fisicoquímica y estructural de microcápsulas de ficocianina en matrices de quitosano y su efecto en el crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.)
Arely Irasema Ruiz-García; Celestino García-Gómez; Adriana Pacheco-Moscoa; Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena; Carlos Alberto Garza-Alonso; Sanjuana Cecilia Galicia-Campos **84**

Celulosa bacteriana como sustrato activo en la producción de plántulas de lechuga (*Lactuca sativa L.*)
Dante Daniel Pérez-Puente; Julia Mariana Márquez-Reyes; Guillermo Cristian Guadalupe Martínez-Ávila; Romeo Rojas-Molina; Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena; Alejandro Luna-Maldonado **95**

SEXTO SEMESTRE

Evaluación de la virulencia de *Metarhizium anisopliae* Metchnikoff mediante la determinación de la CL_{50} y TL_{50}
Daniel Moreno-Arredondo; Adriana Gutiérrez-Díez; Orquídea Pérez-González; Reyna Ivonne Torres-Acosta; Emilio Olivares-Sáenz; Víctor E. Aguirre-Arzola **103**

Incremento de las propiedades funcionales en maíz mediante nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas con *Moringa oleífera*
Eddaliz García-Reyes; Josué I. García-López; Emilio Olivares-Sáenz; Vania Urías-Orona; José Elías Treviño-Ramírez; Guillermo Niño-Medina **112**

SÉPTIMO SEMESTRE

Evaluación morfológica y bioquímica en plántulas de *Solanum lycopersicum* L. con la aplicación de exopolisacáridos de *Porphyridium cruentum*
Elizabeth Garza-Valverde; Celestino García-Gómez; Juan Luis Morales-Landa; Juanita Guadalupe Gutiérrez-Soto; Guillermo Niño-Medina; Noe Luiz-Santos; José Gerardo Uresti-Porras **125**

OCTAVO SEMESTRE

Etiología de cancros en troncos y ramas de árboles de aguacate en cuatro zonas productoras de México
Karen Guadalupe Cantú-Treviño; Adriana Gutiérrez-Díez; Salvador Ochoa-Ascencio; Alejandro Ibarra-López; Francisco Zavala-García; Netzahualcóyotl Mayek-Pérez **136**

Respuesta espectral de perfiles de suelo bajo diferentes sistemas de manejo agrícola: un enfoque basado en análisis digital de imágenes
Vicente Vidal Encinia-Uribe; Edgar Vladimir Gutierrez-Castorena; Ma. del Carmen Gutierrez-Castorena; Víctor Eustorgio Aguirre-Arzola; Rigoberto Eustacio Vázquez-Alvarado; Julia Mariana Márquez-Reyes .. **144**

Valorización sostenible de residuos agrícolas mediante pirólisis integrada con captura biológica de CO_2 y aplicación de biocarbón en sistemas suelo–planta

Jesús Alberto Lara-Reyes*; Celestino García-Gómez; Adriana Pacheco-Moscoa; Alejandro Isabel Luna-Maldonado; Lizangela Guerra-Fuentes; Luis Martín Torres-Treviño; Carlos Alberto Garza-Alonso.
Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399. *Email: jesus.larary s@uanl.edu.mx

Resumen. La quema en campo de residuos agrícolas y forestales emite CO_2, CO, CH_4, N_2O y material particulado fino, y desperdicia carbono y nutrientes que podrían retornar al suelo. Este proyecto propone un sistema que transforma dicha biomasa en biocarbón mediante pirólisis lenta, conduce los gases del proceso a un fotobiorreactor de microalgas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y evalúa la calidad del biocarbón y su efecto sobre el suelo y la interacción suelo-planta en el noreste de México. Comprende cuatro etapas: caracterización de los residuos y optimización de la pirólisis; captura biológica de los gases; caracterización del biocarbón; y evaluación de su efecto en el suelo y el cultivo. Un eje de sensórica e Internet de las Cosas (IoT) con microcontroladores ESP32-S3 interpretará los datos en sitio mediante inteligencia artificial embebida y los transmitirá por LoRaWAN/MQTT; además, modelos de aprendizaje automático con optimización multiobjetivo permitirán equilibrar productividad, impacto ambiental, deterioro del suelo y consumo de energía e insumos. Se espera obtener parámetros de operación que maximicen el rendimiento y la estabilidad del biocarbón, evidencia de su efecto sobre la diversidad microbiana y un modelo tecno-económico (VAN/TIR).
Palabras clave. biocarbón, pirólisis, microalgas, microbiota edáfica, Internet de las Cosas.

Abstract. Open-field burning of agricultural and forestry residues releases CO_2, CO, CH_4, N_2O and fine particulate matter, and wastes carbon and nutrients that could return to the soil. This project proposes a system that converts this biomass into biochar by slow pyrolysis, routes the process gases to a microalgae photobioreactor to reduce greenhouse gas (GHG) emissions, and evaluates biochar quality and its effect on soil and the soil-plant interaction in northeastern Mexico. It comprises four stages: residue characterization and pyrolysis optimization; biological capture of the gases; biochar characterization; and evaluation of its effect on soil and crop. A sensing and Internet of Things (IoT) axis with ESP32-S3 microcontrollers will interpret data on site through embedded artificial intelligence and transmit it via LoRaWAN/MQTT; in addition, machine learning models with multi-objective optimization will balance productivity, environmental impact, soil deterioration, and energy and input use. Expected outcomes include operating parameters that maximize biochar yield and stability, evidence of its effect on microbial diversity, and a techno-economic model (NPV/IRR).
Keywords. biochar, pyrolysis, microalgae, soil microbiota, Internet of Things.

Introducción

La agricultura enfrenta la doble exigencia de aumentar la producción de alimentos y, al mismo tiempo, reducir su huella ambiental en un contexto de cambio climático, degradación de suelos y escasez de agua. En este marco, el manejo de los residuos de cosecha y de las podas, como rastrojos, esquilmos, cáscaras y ramas, constituye un punto crítico. Al final del ciclo productivo, la práctica más común es la quema en campo, un método rápido y de bajo costo aparente para limpiar el terreno. Esta combustión incompleta libera dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y material particulado fino (PM2.5), que deteriora la calidad del aire y se asocia con enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Prateep Na Talang *et al*., 2024). Además, la quema mineraliza y volatiliza buena parte de la materia orgánica y del nitrógeno del residuo, de modo que se pierde un recurso que podría retornar al suelo.

El problema es especialmente relevante en el noreste de México, donde los suelos suelen ser calcáreos, pobres en materia orgánica y sujetos a estrés hídrico. Al mismo tiempo, la región genera volúmenes importantes de residuos agrícolas y forestales sin uso rentable, cuya disposición representa un costo para el productor, lo que abre la oportunidad de convertir un pasivo ambiental en un insumo para recuperar la fertilidad del suelo.

Entre las alternativas propuestas para sustituir la quema, como la incorporación directa del rastrojo, el compostaje y la elaboración de fertilizantes orgánicos, la pirólisis ha recibido una atención creciente. La pirólisis es la descomposición térmica de la biomasa en ausencia o con muy bajo suministro de oxígeno y produce un sólido carbonoso y recalcitrante, denominado biocarbón, junto con una fracción líquida y una mezcla de gases no condensables (Lehmann y Joseph, 2015). La distribución y la calidad de estos productos dependen del tipo de biomasa y de la temperatura, la tasa de calentamiento y el tiempo de residencia; la pirólisis lenta favorece el rendimiento de biocarbón, mientras que las temperaturas altas incrementan su aromaticidad y estabilidad a costa del rendimiento másico (Tripathi *et al*., 2016; Weber y Quicker, 2018). Un análisis de ciclo de vida que comparó la quema abierta, la producción de fertilizante y la producción de biocarbón concluyó que esta última presenta un potencial de calentamiento global netamente negativo, del orden de −1,833 a −1,473 kg CO_2-eq por tonelada de residuo, y el mayor flujo neto de caja (Prateep Na Talang *et al*., 2024). A escala global, el biocarbón sostenible podría compensar una fracción relevante de las emisiones antropogénicas (Woolf *et al*., 2010).

Como enmienda, el biocarbón mejora la retención de agua, la porosidad, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la disponibilidad de nutrientes del suelo. Los metaanálisis reportan incrementos promedio del rendimiento de los cultivos cercanos al 10 %, con respuestas mayores en suelos degradados, ácidos o de textura gruesa y efectos más variables en suelos de clima templado (Jeffery *et al*., 2011; Jeffery *et al*., 2017). Una revisión sistemática de 26 metaanálisis confirma beneficios

consistentes sobre la productividad, el carbono orgánico y la actividad microbiana, aunque advierte que la magnitud depende de la biomasa, del proceso y del suelo receptor (Schmidt *et al*., 2021). El biocarbón también modifica la estructura y la actividad de la comunidad microbiana, al ofrecer superficie y microhábitats para bacterias y hongos (Lehmann *et al*., 2011), y puede reducir en alrededor de 54 % las emisiones de N_2O del suelo (Cayuela *et al*., 2014).

Sin embargo, las soluciones reportadas presentan limitaciones. La corriente gaseosa de la pirólisis, rica en CO_2, CO, H_2 e hidrocarburos ligeros, suele liberarse o quemarse sin aprovechamiento, lo que reduce el beneficio climático del sistema. En paralelo, las microalgas han demostrado ser eficientes para fijar CO_2 de corrientes gaseosas industriales, con tasas de fijación superiores a las de las plantas terrestres y la ventaja de generar biomasa valorizable (Wang *et al*., 2008; Ho *et al*., 2011; Cheah *et al*., 2015). No obstante, la pirólisis, la captura biológica de gases y el efecto edáfico del biocarbón se estudian normalmente por separado, y la mayoría de los trabajos carece de una instrumentación que permita controlar el proceso, cerrar el balance de carbono con datos empíricos y garantizar la trazabilidad de los experimentos. Las herramientas de sensórica, Internet de las Cosas (IoT) y analítica de datos ya se aplican con éxito en la agricultura de precisión (Tzounis *et al*., 2017; Wolfert *et al*., 2017), pero su integración en sistemas de producción y aplicación de biocarbón tiene escasos antecedentes de validación experimental.

Este proyecto propone un sistema integrado que transforma los residuos agrícolas y forestales en biocarbón mediante pirólisis lenta, acopla la salida de gases del horno a un fotobiorreactor de microalgas para reducir o neutralizar las emisiones de GEI del proceso, y evalúa la calidad del biocarbón, su incorporación al suelo y la respuesta de la interacción suelo-planta en condiciones del noreste de México (Figura 1). Las etapas se articulan mediante un eje de sensórica e IoT que instrumenta el horno de pirólisis, el fotobiorreactor y las parcelas, con adquisición de datos en tiempo real, comunicación LoRaWAN/MQTT sobre microcontroladores ESP32, almacenamiento en la nube y analítica de series de tiempo. La propuesta es novedosa porque integra en un mismo esquema tres áreas que habitualmente se abordan de forma aislada, añade una segunda barrera de mitigación sobre los gases que otros sistemas desaprovechan y dota a todo el proceso de control y trazabilidad digital. Con ello se espera generar un protocolo reproducible de valorización con balance favorable de GEI, evidencia local sobre el efecto del biocarbón en suelos de la región y un modelo tecno-económico que permita evaluar su rentabilidad para el productor, en congruencia con un enfoque de economía circular.

Hipótesis. La implementación de un sistema de pirólisis acoplado a un fotobiorreactor de microalgas permite obtener un balance de gases de efecto invernadero favorable respecto a la quema, y la incorporación del biocarbón al suelo mejora significativamente las propiedades edáficas y su interacción con la microbiota y las plantas.

Objetivo general. Evaluar un sistema integrado de pirólisis y captura biológica de gases para la producción de biocarbón a partir de residuos agrícolas, y cuantificar su efecto sobre las propiedades fisicoquímicas y biológicas de un suelo representativo del noreste de México.

Objetivos específicos.

1. Caracterizar fisicoquímicamente los residuos agrícolas y forestales seleccionados como materia prima de pirólisis.
2. Establecer los parámetros de pirólisis para maximizar el rendimiento y la estabilidad del biocarbón mediante un reactor con sensórica, junto con un fotobiorreactor de microalgas acoplado a la salida de gases del horno.
3. Caracterizar morfológicamente el biocarbón obtenido.
4. Evaluar el impacto del biocarbón en el suelo sobre la diversidad microbiana y la interacción suelo-planta, con recopilación de datos mediante sensórica.

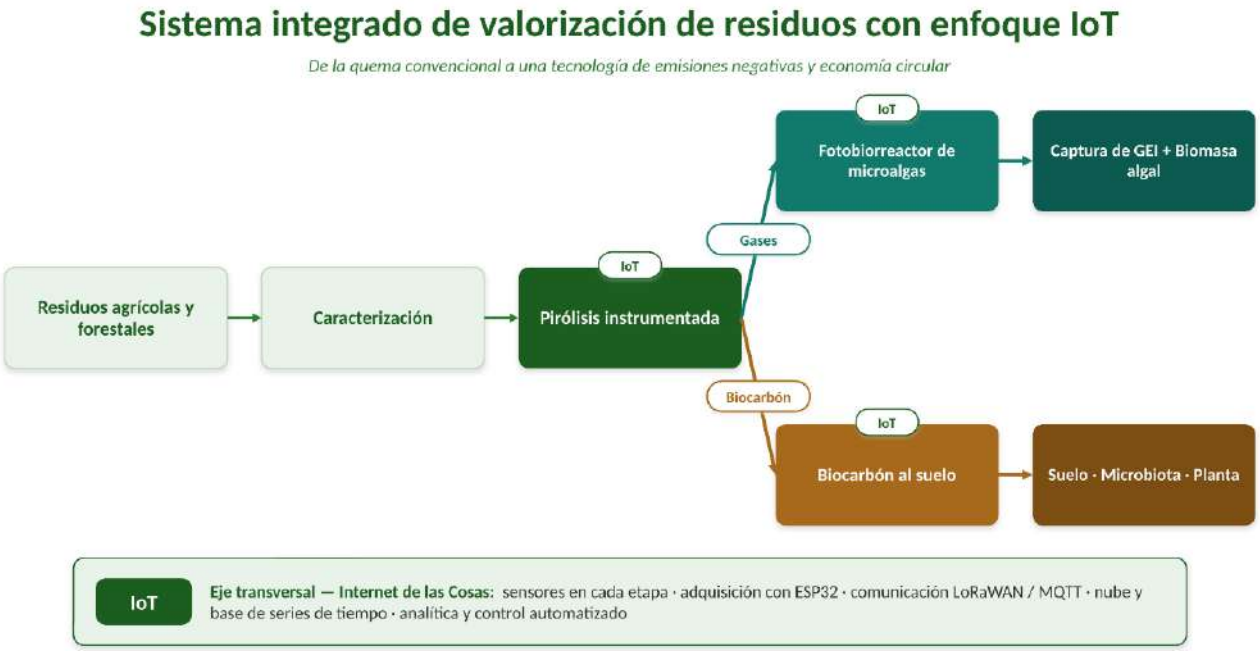


Figura 1. Diagrama de flujo del sistema integral de producción de biocarbón. Se destacan los procesos donde habrá incorporación de sensórica e Internet de las Cosas (IoT).

Materiales y Métodos

Sitio de estudio y materiales

El trabajo se desarrollará en las instalaciones de campo y laboratorio de la Facultad de Agronomía de la UANL, en Nuevo León, México. Como materia prima se emplearán residuos agrícolas y forestales representativos de la región, como rastrojo de sorgo y de maíz, podas y cáscara de nogal y podas de cítricos, seleccionados por su disponibilidad, volumen y relevancia productiva. Se colectarán muestras compuestas que se secarán, molerán, homogeneizarán y conservarán en condiciones controladas.

Objetivo 1. Caracterización de los residuos

Cada biomasa se caracterizará para determinar su aptitud como materia prima de pirólisis. Se determinará la humedad por secado en estufa a masa constante; el análisis próximo (materia volátil, cenizas y carbono fijo) por termogravimetría y mufla; el análisis último (C, H, N, S y O por diferencia) en un analizador elemental, a partir del cual se calcularán las relaciones atómicas H/C y O/C; y la composición lignocelulósica (celulosa, hemicelulosa y lignina) por el método de Van Soest. El perfil de descomposición térmica se obtendrá por termogravimetría (TGA/DTG) para definir los intervalos de temperatura de trabajo, y el poder calorífico se medirá en bomba calorimétrica.

Objetivo 2. Pirólisis instrumentada y fotobiorreactor acoplado

La conversión termoquímica se realizará en un reactor de pirólisis lenta de lecho fijo operado en atmósfera inerte (N_2). Se evaluará un diseño factorial de tres factores con tres niveles, temperatura (400, 500 y 600 °C), tasa de calentamiento (5, 10 y 20 °C min^{-1}) y tiempo de residencia (30, 60 y 90 min), con tres réplicas, complementado con metodología de superficie de respuesta (RSM) para localizar las condiciones que maximicen de forma conjunta el rendimiento de biocarbón y su estabilidad, expresada mediante relaciones H/C y O/C bajas (Tripathi *et al*., 2016; Weber y Quicker, 2018).

El reactor contará con termopares tipo K en el lecho y la pared, control PID de la temperatura y la rampa de calentamiento, celda de carga para seguir la pérdida de masa en continuo, sensores de presión y flujo, y un tren de análisis de gases (CO_2, CO, CH_4, H_2 y O_2) a la salida. Los gases no condensables se acondicionarán mediante enfriamiento, remoción de alquitranes y partículas y dilución controlada, antes de conducirse al fotobiorreactor.

Se implementará un fotobiorreactor de columna de burbujeo inoculado con cepas tolerantes a concentraciones elevadas de CO_2, como *Chlorella vulgaris* y *Desmodesmus* sp. (Ho *et al*., 2011; Cheah *et al*., 2015). Se compararán tratamientos con distintos caudales de gas de proceso frente a un control sin suministro de gas. La eficiencia de remoción se calculará como [(CO_2 entrada − CO_2 salida) /CO_2 entrada] × 100, con concentraciones medidas en línea; la productividad de biomasa se seguirá por densidad óptica y peso seco, y la tasa de fijación de carbono se estimará con base en la productividad y el contenido de carbono de la biomasa algal (Wang *et al*., 2008). El fotobiorreactor se instrumentará con sensores de pH, temperatura, oxígeno disuelto, densidad óptica y radiación fotosintéticamente activa, con lazos de control para la dosificación de gas y la iluminación LED.

Objetivo 3. Caracterización del biocarbón

El biocarbón obtenido en las condiciones óptimas se caracterizará siguiendo los lineamientos para biocarbón de uso agrícola (Schmidt *et al*., 2021). La morfología y la microestructura se analizarán por microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersiva (SEM-EDS), el área superficial y la porosidad por adsorción de N_2 (método

BET), y los grupos funcionales superficiales por espectroscopía infrarroja (FTIR). Se determinarán además el pH y la conductividad eléctrica por potenciometría, la CIC por el método de acetato de amonio, el análisis próximo y último, el contenido de nutrientes (N, P, K, Ca y Mg) y la presencia de elementos potencialmente tóxicos por ICP-OES, como criterio de bioseguridad previo a su aplicación al suelo.

Objetivo 4. Efecto en el suelo, la microbiota y la interacción suelo-planta

Se realizarán, de forma secuencial, ensayos de incubación en laboratorio, experimentos en maceta en invernadero y parcelas de campo con un suelo representativo del noreste de México. Los tratamientos serán T0 (suelo sin enmienda), T1, T2 y T3 (dosis baja, media y alta de biocarbón), T4 (fertilización convencional) y T5 (biocarbón con fertilización), en un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Se medirán propiedades físicas (densidad aparente, porosidad, estabilidad de agregados y retención de humedad), químicas (pH, conductividad eléctrica, CIC, carbono orgánico, N total, P y K disponibles) y biológicas (respiración del suelo, carbono de la biomasa microbiana y actividades enzimáticas). Los flujos de CO_2, N_2O y CH_4 del suelo se cuantificarán con cámaras estáticas (Cayuela *et al*., 2014).

La respuesta de la comunidad microbiana se evaluará mediante secuenciación de amplicones del gen 16S rRNA (bacterias y arqueas) y de la región ITS (hongos). Se estimarán índices de diversidad alfa y beta, y se relacionarán los cambios comunitarios con las propiedades edáficas mediante análisis de coordenadas principales y PERMANOVA; se complementará con la cuantificación por qPCR de genes funcionales del ciclo del nitrógeno (Lehmann *et al*., 2011). En la interacción suelo-planta se evaluarán cultivos de la región, como sorgo o maíz, midiendo emergencia, altura, biomasa aérea y radical, concentración foliar de nutrientes, índice SPAD, eficiencia en el uso del agua y rendimiento, bajo dos niveles de disponibilidad hídrica (Jeffery *et al*., 2011).

Las parcelas se instrumentarán con nodos ESP32-S3 y sensores de humedad, temperatura, conductividad eléctrica y pH del suelo. El ESP32-S3 integra dos núcleos a 240 MHz, 512 KB de SRAM e instrucciones vectoriales que aceleran las redes neuronales (Espressif Systems, 2026), por lo que cada nodo podrá interpretar los datos en sitio con inteligencia artificial embebida (TinyML; David *et al*., 2021) y no solo enviar datos crudos: un modelo cuantizado validará las lecturas (valores atípicos y deriva del sensor), las corregirá con la calibración específica para suelo con biocarbón y estimará la humedad y su tendencia a corto plazo. Por LoRaWAN, una red de baja tasa, se enviarán los resultados interpretados y un resumen de los datos crudos. Los modelos se entrenarán fuera de línea con los datos del proyecto, se compararán con un modelo ingenuo y se actualizarán por radio; la interpretación se relacionará con la respuesta microbiana y del cultivo del objetivo 4. Los datos de los tres subsistemas se transmitirán por LoRaWAN y MQTT a una base de datos de series de tiempo en la nube (Tzounis *et al*., 2017; Wolfert *et al*., 2017). El control del reactor y

del fotobiorreactor será local, con paro de seguridad independiente del microcontrolador.

Análisis estadístico y evaluación tecno-económica

Los datos se analizarán mediante análisis de varianza y modelos mixtos, con comparación de medias por la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$), análisis de correlación y componentes principales. Las series de tiempo de los sensores se modelarán con la metodología Box-Jenkins (ARIMA/SARIMA) para la predicción y el control del proceso. Finalmente, se estimará el balance de carbono del sistema frente a la quema y se construirá un modelo tecno-económico con estructura de costos de inversión y operación (CAPEX/OPEX), evaluado mediante el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR). Estos análisis se complementarán con aprendizaje automático, como se describe a continuación.

Aprendizaje automático y optimización multiobjetivo

Además del análisis estadístico, se construirán modelos del proceso con aprendizaje automático, siguiendo la arquitectura de Torres-Treviño *et al*. (2024): modelado con redes neuronales, validación con métricas estadísticas y optimización multiobjetivo. Con los datos del diseño factorial de pirólisis (temperatura, tasa de calentamiento y tiempo como entradas; rendimiento, H/C, O/C, cenizas y consumo de energía como salidas) y los del fotobiorreactor, las macetas y el campo, se entrenarán redes neuronales y bosques aleatorios, que se compararán con los modelos de superficie de respuesta y con un modelo ingenuo mediante validación cruzada y las métricas MSE, PRESS y R^2pred. Como el número de corridas es limitado, estos modelos complementan, y no sustituyen, el análisis de varianza para probar el efecto de los tratamientos, y las lecturas continuas de los sensores no se tratarán como repeticiones.

Con los modelos validados se aplicará un algoritmo evolutivo multiobjetivo (MOEA/D o NSGA-II) para obtener el frente de Pareto entre criterios en conflicto: maximizar el rendimiento y la estabilidad del biocarbón y la captura de CO_2 por las microalgas, y minimizar el consumo de energía, de N_2 y de insumos, las emisiones de GEI y el deterioro del suelo (pérdida de carbono orgánico o aumento de la conductividad eléctrica). La persona investigadora elegirá una solución del frente según el criterio de decisión, y se verificará con corridas confirmatorias en el reactor y en campo.

Plan de trabajo y calendarización

El proyecto se desarrollará en ocho semestres, de agosto de 2026 a junio de 2030. El primer año se dedicará a la caracterización de los residuos y a la construcción del reactor instrumentado; el segundo, a la optimización de la pirólisis, la operación del fotobiorreactor y la caracterización del biocarbón; el tercero, a los ensayos de incubación y maceta y al análisis de la microbiota; y el cuarto, al experimento de campo, la integración del balance de carbono y el modelo financiero, y la redacción y defensa de la tesis (Cuadro 1).

Resultados esperados

Los biocarbones caracterizados con modelos predictivos de su calidad, un protocolo de calibración de sensores para suelo con biocarbón, evidencia de campo de al menos dos ciclos sobre salud del suelo, microbiota, GEI y rendimiento de sorgo, un balance de carbono preliminar para el noreste de México y tres artículos científicos.

Cuadro 1. Calendarización de las actividades por objetivo específico, de agosto de 2026 a junio de 2030.

Actividad	2026	2027		2028		2029		2030
	Ago.-Dic.	Ene.-Jun.	Ago.-Dic.	Ene.-Jun.	Ago.-Dic.	Ene.-Jun.	Ago.-Dic.	Ene.-Jun.
Biomasa y DG1	X	X						
Reactor y RSM	X	X	X	X				
Calidad del biocarbón		X	X	X				
Microalgas	X	X	X	X				
Incubación y macetas			X	X	X	X		
Campo (≥ 2 ciclos)					X	X	X	
Microbiota				X	X	X	X	
IoT y calibración	X	X		X	X	X	X	
Aprendizaje automático y optimización			X	X	X	X	X	X
Balance de carbono				X	X	X	X	X
Artículos y tesis			X	X	X	X	X	X

Nota. X es la actividad programada en el semestre; RSM: superficie de respuesta; OE: objetivo específico; IoT: Internet de las Cosas.

Desglose financiero

El presupuesto con monto asciende a $784,000 MXN, repartido en cuatro etapas (Cuadro 2). Es aproximado: los rubros se estimaron con cotizaciones comparadas y el reactor se comprará o construirá según DG1. Varias partidas aún carecen de monto y se cotizarán: gases certificados y N_2, electricidad, H_2 por TCD o micro-GC, servicios de HAP, metales y BET, el lote de campo de ≈ 200 kg, cámaras de GEI, mano de obra de campo, cuotas de publicación, seguridad y contingencia.

Cuadro 2. Presupuesto aproximado por etapa y fuente del recurso (MXN).

Concepto	Monto para utilizar (MXN)	Fuente del recurso
Reactor de pirólisis instrumentado	$180,000	Fondo Privado por vinculación con empresa
Analizador de gases (NDIR, O_2, CH_4)	$70,000	
Equipo IoT (ESP32, sensores, gateway)	$45,000	
Servicios analíticos (CHNS, TGA, Van Soest)	$30,000	
Reactivos y consumibles; viáticos de colecta	$37,000	
Fotobiorreactor y accesorios	$60,000	
Reactivos de cultivo; servicios BET, FTIR y SEM	$55,000	
Secuenciación 16S e ITS y qPCR	$90,000	
Reactivos edáficos y enzimáticos; eventos	$60,000	
Insumos de invernadero	$15,000	

Insumos de campo (semilla, riego, parcelas)	$30,000
Sensores edáficos y cámaras de GEI	$50,000
Nube; viáticos, publicación y congreso	$62,000
Total	**$784,000**

Nota. Montos estimados en pesos mexicanos (MXN).

Agradecimientos

Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de posgrado otorgada, y a la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León por las facilidades de infraestructura para el desarrollo de este proyecto.

Referencias Bibliográficas

Cayuela, M. L., van Zwieten, L., Singh, B. P., Jeffery, S., Roig, A. & Sánchez-Monedero, M. A. (2014). Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment, 191, 5-16.

Cheah, W. Y., Show, P. L., Chang, J.-S., Ling, T. C. & Juan, J. C. (2015). Biosequestration of atmospheric CO_2 and flue gas-containing CO_2 by microalgae. Bioresource Technology, 184, 190-201.

Ho, S.-H., Chen, C.-Y., Lee, D.-J. & Chang, J.-S. (2011). Perspectives on microalgal CO_2-emission mitigation systems: A review. Biotechnology Advances, 29(2), 189-198.

Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M. & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment, 144(1), 175-187.

Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A. C., van Groenigen, J. W., Hungate, B. A. & Verheijen, F. (2017). Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. Environmental Research Letters, 12(5), 053001.

Lehmann, J. & Joseph, S. (Eds.). (2015). Biochar for environmental management: Science, technology and implementation (2.ª ed.). Londres: Routledge.

Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C. & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota: A review. Soil Biology and Biochemistry, 43(9), 1812-1836.

Prateep Na Talang, R., Na Sorn, W., Polruang, S. & Sirivithayapakorn, S. (2024). Alternative crop residue management practices to mitigate the environmental and economic impacts of open burning of agricultural residues. Scientific Reports, 14, 14372.

Schmidt, H.-P., Kammann, C., Hagemann, N., Leifeld, J., Bucheli, T. D., Sánchez-Monedero, M. A. & Cayuela, M. L. (2021). Biochar in agriculture: A systematic review of 26 global meta-analyses. GCB Bioenergy, 13(11), 1708-1730.

Torres-Treviño, L., Escamilla-Salazar, I., & González-Ortíz, B. (2024). On

developing a green and intelligent manufacturing system. *Expert Systems with Applications*, *243*, 122876.

Tripathi, M., Sahu, J. N. & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 467-481.

Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T. & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. Biosystems Engineering, 164, 31-48.

Wang, B., Li, Y., Wu, N. & Lan, C. Q. (2008). CO_2 bio-mitigation using microalgae. Applied Microbiology and Biotechnology, 79(5), 707-718.

Weber, K. & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. Fuel, 217, 240-261.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C. & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming: A review. Agricultural Systems, 153, 69-80.

Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J. & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. Nature Communications, 1, 56.

Control de fitopatógenos del pimiento (*Capsicum annuum* L) mediante emulsiones de aceites esenciales

José Macario Padilla-Garza[1*]; Romeo Rojas-Molina[1]; Adriana Gutierrez-Díez[1]; Nancy del Pilar Medina-Herrera[1]; Julia Mariana Márquez-Reyes[1]; Raúl Rodríguez-Guerra[2]; Guillermo Cristian Martínez-Ávila[1]
[1]Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, Campus de Ciencias Agropecuarias, Av. Francisco Villa s/n, Col. Ex Hacienda El Canadá. 66050, Municipio General Escobedo, Nuevo León, México.
[2]Campo Experimental General Terán, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Carretera Montemorelos - China Km. 31, C.P. 67400, Ciudad General Terán, Municipio General Terán, Nuevo León, México.
*Email: jose.padillag@uanl.edu.mx

Resumen. Las enfermedades bacterianas y fúngicas constituyen una de las principales limitantes para la producción de pimiento dulce (Capsicum annuum L.), destacando la mancha bacteriana causada por Xanthomonas spp. y la marchitez vascular provocada por Fusarium oxysporum f. sp. capsici. Aunque su control se basa comúnmente en agroquímicos sintéticos, su uso continuo favorece problemas de resistencia microbiana, toxicidad y contaminación ambiental. Como alternativa sostenible, los aceites esenciales (AEs) han demostrado actividad antimicrobiana frente a diversos fitopatógenos; sin embargo, su aplicación agrícola se ve limitada por su volatilidad, baja estabilidad y escasa solubilidad en agua. En este contexto, el objetivo de esta investigación es extraer y caracterizar los aceites esenciales destinados al desarrollo posterior de emulsiones antimicrobianas para su evaluación en cultivos de pimiento dulce. Los aceites esenciales de Citrus sinensis y Flourensia cernua se obtuvieron mediante destilación por arrastre de vapor a escala piloto utilizando un sistema tipo Clevenger. Se determinaron el rendimiento de extracción y la densidad como parámetros físicos básicos para futuras formulaciones. Los rendimientos obtenidos fueron de 0.244 ± 0.013% para C. sinensis y 0.609 ± 0.127% para F. cernua. Asimismo, las densidades registradas fueron de 0.777 ± 0.070 g/mL y 0.850 ± 0.017 g/mL, respectivamente, valores consistentes con los reportados en la literatura. Ambas especies produjeron aceites menos densos que el agua, confirmando su naturaleza hidrofóbica. Los resultados validan la viabilidad técnica de la extracción y las propiedades físicas de los aceites esenciales estudiados, proporcionando una base sólida para el desarrollo de emulsiones estables con potencial aplicación como fitosanitarios naturales en sistemas de producción sostenible.
Palabras clave. Alternativa sostenible, Actividad antimicrobiana, Terpenos, Pimiento, Encapsulación

Abstract. Bacterial and fungal diseases are one of the main limitations for sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) production, with bacterial spot caused by *Xanthomonas* spp. and vascular wilt caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici* standing out. Although their control is commonly based on synthetic agrochemicals, continuous use promotes problems like microbial resistance, toxicity, and environmental pollution. As a sustainable alternative, essential oils (EOs) have shown antimicrobial activity against various plant pathogens; however, their agricultural application is limited by their volatility, low stability, and poor water solubility. In this context, the aim of this research is to extract and characterize essential oils for the subsequent development of antimicrobial emulsions to test on sweet pepper crops. The essential oils of *Citrus sinensis* and *Flourensia cernua* were obtained through steam

distillation on a pilot scale using a Clevenger-type system. Extraction yield and density were determined as basic physical parameters for future formulations. The yields obtained were 0.244 ± 0.013% for *C. sinensis* and 0.609 ± 0.127% for *F. cernua*. Likewise, the recorded densities were 0.777 ± 0.070 g/mL and 0.850 ± 0.017 g/mL, respectively, values consistent with those reported in the literature. Both species produced oils less dense than water, confirming their hydrophobic nature. The results validate the technical feasibility of the extraction and the physical properties of the studied essential oils, providing a solid basis for the development of stable emulsions with potential application as natural pesticides in sustainable production systems.
Keywords. Sustainable alternative, Antibacterial activity, Terpenes, Sweet pepper, Encapsulation

Introducción

Las enfermedades bacterianas y fúngicas representan una de las principales limitantes en la producción de pimiento dulce (*Capsicum annuum* L.). Entre ellas destacan la mancha bacteriana causada por especies de *Xanthomonas*, que reduce la cantidad y calidad de las cosechas (Khalil & Abo-Elyousr, 2019), y la marchitez por *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici*, capaz de ocasionar pérdidas de hasta el 70% y provocar pudrición de raíces, marchitez vascular y muerte de plántulas (El-Nagar *et al.,* 2022; Al-aamel *et al.,* 2023). Aunque el control tradicional se basa en agroquímicos sintéticos, principalmente formulaciones cúpricas y antibióticos, su uso continuo favorece problemas de toxicidad, contaminación ambiental y resistencia microbiana (Khalil & Abo-Elyousr, 2019).

El deterioro microbiológico constituye una de las principales causas de pérdidas y desperdicio de alimentos a lo largo de la cadena de suministro, especialmente por infecciones fúngicas en frutas, con repercusiones económicas y ambientales significativas (Tovar *et al.,* 2018). Ante esta situación, existe un creciente interés por alternativas sostenibles, entre ellas los AEs obtenidos de plantas aromáticas, los cuales han mostrado potencial como agentes de biocontrol frente a patógenos bacterianos y fúngicos (Khalil & Abo-Elyousr, 2019).

Los AEs contienen una mezcla compleja de compuestos volátiles sintetizados en distintas partes de las plantas (Castro *et al.,* 2017). Muchos de estos metabolitos poseen propiedades bactericidas y fungicidas que forman parte de los mecanismos naturales de defensa vegetal (Ibrahim, 2019). Su actividad antimicrobiana está asociada a compuestos como terpenos, alcoholes, aldehídos y fenoles, capaces de alterar membranas y paredes celulares microbianas, favoreciendo la pérdida de integridad celular (Castellanos *et al.,* 2020). Asimismo, los compuestos fenólicos pueden oxidarse a quinonas tóxicas e interferir en rutas metabólicas esenciales de los patógenos (Chen *et al.,* 2019; McClements, 2021).

Diversas especies vegetales han demostrado potencial para la obtención de AEs con actividad fitosanitaria. En México destacan especies del género *Lippia*, cuyos aceites ricos en carvacrol y timol presentan actividad antifúngica, atribuida tanto a compuestos mayoritarios como a efectos sinérgicos entre metabolitos (Oliveira *et al.,* 2019). Del mismo modo, extractos de

Flourensia spp. han mostrado efectos inhibitorios contra *Alternaria* spp., *Rhizoctonia solani* y *Fusarium oxysporum* (Jasso de Rodríguez *et al.,* 2017). Los aceites esenciales de cítricos, caracterizados por su alto contenido de D-limoneno, también han evidenciado actividad antifúngica y antibacteriana frente a diversos microorganismos patógenos (Mahato *et al.,* 2017; Rezende *et al.,* 2020; Anwar *et al.,* 2023).

A pesar de sus ventajas, la aplicación agrícola de los AEs enfrenta limitaciones relacionadas con su volatilidad, baja estabilidad, escasa solubilidad en agua y posibles efectos fitotóxicos (Chang *et al.,* 2022; Maurya *et al.,* 2024). Por ello, la encapsulación mediante micro o nanoemulsiones ha surgido como una estrategia eficaz para mejorar la estabilidad y liberación controlada de compuestos bioactivos hidrofóbicos (McClements, 2021).

Entre los materiales más prometedores para estas formulaciones destaca el quitosano, un polisacárido biodegradable con propiedades antimicrobianas, antioxidantes y capacidad para formar películas, ampliamente utilizado en agricultura y conservación de alimentos (Tovar *et al.,* 2018; Wang & Zhuang, 2022). Además, su estructura química facilita la incorporación de compuestos activos (Yu *et al.,* 2021). Complementariamente, la lecitina de soya, considerada un ingrediente GRAS, permite la formación de nanopartículas lipídicas estables sin necesidad de tensioactivos sintéticos (Maurya *et al.,* 2024).

En conjunto, la integración de aceites esenciales en matrices poliméricas basadas en quitosano y lecitina representa una estrategia prometedora para desarrollar fitosanitarios de origen natural orientados al control de la mancha bacteriana y la marchitez vascular del pimiento bajo esquemas de producción sostenible y orgánica.

Objetivo general

El objetivo general es desarrollar una formulación antimicrobiana a base de emulsiónes de aceites esenciales mediante su extracción, caracterización y evaluación en un cultivo de pimiento dulce en condiciones de invernadero. Por lo tanto, para la primer etapa de esta investigación el propósito fue extraer y caracterizar los aceites esenciales a emplear como parte del primer objetivo específico.

Materiales y métodos

Se extrajeron los aceites esenciales de naranja y hojasen, utilizando las partes aéreas (hojas) de hojasén (*Flourencia cernua*) que fueron colectadas de una comunidad del desierto mexicano (Estanque de León, Cuatro Ciénegas, Coahuila) durante octubre de 2026 y un subproducto agroindustrial: cáscaras de naranja dulce (*Citrus sinensis*) que se obtuvo de una juguera local (Jugos y Concentrados Regios Co., Monterrey, Nuevo León, México), durante agosto y septiembre de 2026. Posteriormente, se sometieron a un proceso de secado en una estufa de convección a temperatura controlada de 50 °C durante 48 h y las muestras se colocaron en bolsas herméticas hasta su uso (Aranda-Ledesma *et al*., 2022).

Destilación. La extracción de los aceites esenciales se llevó a cabo mediante el método de destilación por arrastre de vapor utilizando un aparato tipo Clever a una escala piloto.



Figura 1. Destilación por arrastre de vapor.

El material vegetal seco se colocó en una cámara de extracción, con agua destilada para la generación del vapor (Kayiran *et al.*, 2025), escalado a una proporción de 5 Kg de material por 25 L de agua aproximadamente. El equipo se calentó hasta el punto de ebullición que genera el vapor para arrastre de los compuestos volátiles (Bahri *et al*., 2025). El vapor se condujo a un condensador conectado a un refrigerador de agua, para realizar la separación (Aranda-Ledesma *et al*., 2022).

Parámetros de tiempo y temperatura. El proceso de destilación se mantuvo de forma continua durante un periodo de 1 – 2 horas a una temperatura controlada de aproximadamente 95 – 100 °C (Torres-Martínez *et al.*, 2025).

Separación y purificación. El aceite esencial obtenido se separó de la fase acuosa (hidrolato) mediante partición líquido-líquido dadas las diferencias de densidad entre el aceite esencial y el agua (Torres-Martínez *et al.*, 2025).

Almacenamiento y conservación. Los aceites esenciales puros obtenidos se almacenaron en frascos de vidrio ámbar a 4 °C., herméticamente cerrados para protegerlos de la luz (Aranda-Ledesma, 2022).

Rendimiento de la extracción. El rendimiento del aceite esencial se calculó basándose en la relación entre el peso del extracto obtenido y del peso seco del material vegetal utilizado, expresando el resultado como un porcentaje de peso/volumen (% p/v).

Operación de extracción intensiva. Con el fin de obtener el volumen requerido de aceite esencial de cáscara de naranja dulce (*Citrus sinensis*) para su caracterización, se realizaron 50 corridas de destilación por arrastre de vapor durante 16 días hábiles (3 - 4 lotes diarios). En total, se procesaron aproximadamente 500 Kg de pericarpio fresco, equivalentes a 150 Kg de materia seca tras el secado. De manera complementaria, para la obtención del aceite esencial de hojasen (*Flourensia cernua*), se estableció un esquema de procesamiento a escala piloto diseñado para acopiar el volumen necesario para las fases analíticas de caracterización (GC-MS, FTIR) y la posterior formulación de las emulsiones.

Durante este periodo, se procesó una masa total acumulada de 95 Kg de biomasa vegetal, la cual fue acondicionada y fraccionada en cargas de ~3 Kg por lote de extracción. La operación del equipo se llevó

a cabo a un ritmo de 3 - 4 lotes diarios, completando un total de 30 corridas experimentales independientes a lo largo de 10 días hábiles de trabajo de laboratorio.

Caracterización de aceites esenciales. La composición química y los grupos funcionales de los aceites esenciales se determinarán mediante GC-MS y ATR-FTIR, respectivamente, de acuerdo con metodologías previamente reportadas, y se empleará para la estandarización de las emulsiones y la correlación de los compuestos activos con la actividad antimicrobiana en la siguiente fase de la investigación.

Asimismo, se encuentra en desarrollo una revisión bibliográfica sobre los mecanismos de resistencia y biocontrol en *Capsicum annuum* L., enfocada en el potencial antimicrobiano y la inducción de respuestas de defensa vegetal por compuestos bioactivos presentes en *Citrus sinensis* y *Flourensia cernua*, cuyos avances se muestran a continuación.

Construcción de la revisión de literatura. La revisión bibliográfica se llevó a cabo en Scopus, una base de datos académica de prestigio internacional, ya que sus documentos son evaluados bajo un riguroso criterio de verificación.

El enfoque de la búsqueda fueron las publicaciones recientes sobre organismos patógenos del pimiento dulce. Para esto, se desarrolló un plan de búsqueda que consistió en ingresar directamente en el motor de consultas de la base de datos las palabras clave '"*sweet pepper*" *pathogens*' (Figura 2).

Se seleccionaron para incluir en el análisis, los trabajos recientes que se ubiesen publicado en el periodo comprendido entre el año 2020 y el 2026. Se seleccionaron unicamente artículos científicos originales, excluyendo otros tipos de publicaciones como son los artículos de revisión (*reviews*), capítulos de libros, actas de congresos y notas científicas, puesto que se deseaba que fueran datos de trabajos experimentales. Por último, se realizó una selección de títulos y resúmenes, descartando estudios no relevantes, incluyendo trabajos como los relacionados con genética, medicina, fertilizantes, suelo, nutrición humana y metales pesados y otras áreas ajenas al tema de estudio.

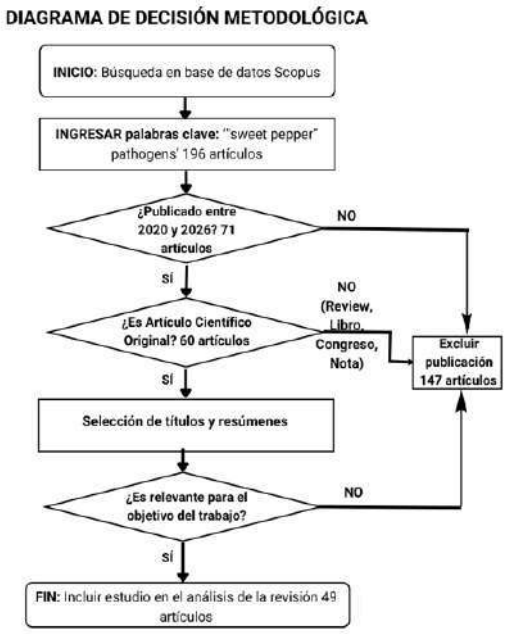


Figura 2. Número de artículos resultantes de la búsqueda usando las palabras clave "sweet pepper pathogens" en la base de datos Scopus.

Resultados y discusión

El proceso de extracción permitió obtener los aceites esenciales de *Citrus sinensis* y *Flourensia cernua*. Los valores promedio y

desviaciones estándar del rendimiento de extracción se presentan en el Cuadro 1.

El aceite esencial de *Citrus sinensis* presentó un rendimiento medio de 0.244 ± 0.013%. Este resultado coincide de manera precisa con lo reportado en la literatura científica para la hidrodestilación de cáscaras de naranja, donde se registran rendimientos característicos que oscilan entre 0.24% y 1.07% en masa seca (Brah *et al.,* 2024). Asimismo, estudios de extracción de cáscaras de cítricos mediante destilación tradicional señalan rendimientos promedio de 0.21% - 0.24% (Mahato *et al.,* 2019). La reducida desviación estándar registrada (±0.013%) evidencia una alta reproducibilidad y estabilidad del proceso a escala piloto.

Por su parte, *Flourensia cernua* (hojasén) alcanzó un rendimiento de extracción de 0.609 ± 0.127%. *F. cernua* es un arbusto resinoso característico de zonas áridas cuyas hojas se encuentran recubiertas por una capa lipídica y oleosa rica en metabolitos secundarios volátiles (Jasso de Rodríguez *et al.,* 2017). La abundante presencia de compuestos terpenoides como el β-eudesmol, el β-cariofileno y el epóxido de isoaromadendrene en el tejido foliar de esta especie favorece un mayor rendimiento en comparación con los epicarpios cítricos (Jasso de Rodríguez *et al.,* 2017). Aranda-Ledesma *et al.,* (2022) reportaron rendimientos de extracción de aceite esencial de *Flourensia cernua* entre 0.10 % y 0.31 % utilizando destilación por arrastre de vapor. En comparación, los rendimientos obtenidos en el presente estudio fueron superiores, lo que podría estar asociado a la variabilidad intrínseca de la matriz vegetal y a diferencias en la composición y proporción de compuestos volátiles, factores que pueden influir en la eficiencia de extracción y en la variabilidad entre lotes (Aranda-Ledesma *et al.,* 2024).
La densidad influye en la pureza y la dispersión del aceite esencial. En el Cuadro 2 se presentan los valores de densidad obtenidos para las especies analizadas. El aceite esencial de *C. sinensis* registró una densidad promedio de 0.777 ± 0.070 g/mL. Este resultado es altamente congruente con los reportes de la literatura para el aceite esencial purificado de cáscara de *C. sinensis*, los cuales señalan una densidad promedio de 0.778 g/cm^3 (o g/mL) (Anwar *et al.,* 2023). La baja densidad del aceite de naranja podría deberse a que su composición química está dominada por monoterpenos hidrocarbonados ligeros de bajo peso molecular, principalmente D-limoneno (que constituye más del 90% del aceite), provocando que sea insoluble y flote sobre la fase acuosa (Anwar *et al.,* 2023).

Finalmente, el aceite esencial de *Flourensia cernua* presentó una densidad de 0.850 ± 0.017 g/mL. Este valor concuerda con el comportamiento físico de aceites ricos en monoterpenos oxigenados y sesquiterpenos, cuyas densidades típicamente se encuentran en el rango de 0.843 a 0.907 g/cm^3 (Arruda *et al.,* 2025). El incremento en la densidad respecto al aceite de naranja se explica por la presencia de estructuras sesquiterpénicas más complejas y oxigenadas (Jasso de Rodríguez *et al.,* 2017).

Todas las muestras analizadas mostraron densidades inferiores a 1.0 g/mL, lo que

confirma que los aceites esenciales obtenidos son menos densos que el agua e inmiscibles en ella. Esta característica física es crucial para el posterior diseño de emulsiones y recubrimientos activos, donde se requiere la adición de tensioactivos y biopolímeros (como quitosano o carboximetilcelulosa) para lograr la estabilización y dispersión homogénea del tratamiento sobre la superficie foliar.

Cuadro 1. Rendimiento de extracción de aceites esenciales (%)

Especie	Media (R)	DE
C. sinensis	0.244	±0.013
F. cernua	0.609	±0.127

Nota. R = rendimiento de extracción; DE = desviación estándar. Los valores se expresan como media ± desviación estándar.

Cuadro 2. Densidad de los aceites extraídos de las especies estudiadas.

Especie	Media (g/mL)	DE (g/mL)
C. sinensis	0.777	±0.070
F. cernua	0.850	±0.017

Nota. DE = desviación estándar; N/A = no aplicable. Los valores se expresan como media y desviación estándar.

Anances en la construcción de la revisión de literatura.

Se identificaron 196 documentos en la base de datos Scopus (www.scopus.com, consulta el 21 de septiembre de 2026) a partir de la metodología de búsqueda establecida para esta revisión, usando las palabras clave *'"sweet pepper" pathogens'*, publicados en el periodo comprendido entre 1987 y 2026 (Figura 3). Al analizar la línea de tiempo, se hace evidente que la valorización de métodos alternativos y biológicos para el control de fitopatógenos en pimiento dulce ha sido un área bajo constante investigación durante la última década aproximadamente, registrando una tendencia promedio estable en el volumen de publicaciones en los últimos seis años.

Al restringir la búsqueda al intervalo de 2020 a 2026, los resultados obtenidos incluyeron: 60 artículos de investigación original, 7 artículos de revisión (reviews), 2 capítulos de libro, 1 trabajos de divulgación en congresos y 1 nota científica. En este contexto, la distribución de los artículos científicos de investigación entre las principales casas editoriales se estructuró de la siguiente manera: Springer Nature (11) = Elsevier (11) > Wiley (6) > MDPI (5) > American Society for Horticultural Science (4) > Frontiers Media (3) > Oxford University Press (2) = PLOS ONE (2) = Taylor & Francis (2) = Hindawi (2) = Universidade Federal Rural de Pernambuco (2) = International Society for Horticultural Science (2) > otras editoriales independientes (19). Cabe destacar que las editoriales Springer Nature y Elsevier, concentraron la mayor cantidad de contribuciones, acumulando un total de once artículos, cada una. Finalmente, y de acuerdo con los criterios de selección detallados en la sección metodológica, se seleccionaron 49 artículos experimentales clave directamente relacionados con el manejo no químico de patógenos en pimiento para conformar la discusión de esta revisión.

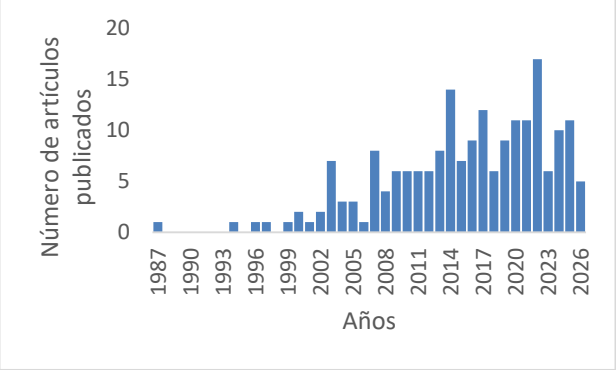


Figura 3. Número de artículos resultantes de la búsqueda usando las palabras clave "sweet pepper pathogens" en la base de datos Scopus.

Conclusiones

Se extrajeron y caracterizaron exitosamente los aceites esenciales de *C. sinensis* y *F. cernua*, obteniendo rendimientos y densidades acordes con lo reportado en la literatura. Estos resultados validan la disponibilidad, viabilidad y propiedades físicas básicas de los aceites, proporcionando la base necesaria para la formulación de emulsiones estables.

Por otro lado, el análisis bibliográfico de publicaciones indexadas en Scopus (2020-2026) evidencia un creciente interés científico en el manejo no químico de enfermedades en *Capsicum annuum* L., respaldado por 49 estudios especializados y una alta proporción de artículos de investigación original. Los resultados confirman la relevancia actual de los bioplaguicidas, los metabolitos secundarios y las tecnologías de encapsulación como alternativas sostenibles para el control de fitopatógenos.

Agradecimientos

A la Facultad de Agronomía de la UANL, y al SECIHTI por la beca otorgada (CVU: 267384).

Referencias bibliográficas

Al-aamel, A., Nasser, A., Al-maliky, B. & Subair, A. (2023). Control Pepper Fusarium Wilting by biocontrol agent Trichoderma harzianum and Chelated Iron Fe-EDDHA, Baghdad Science Journal: Vol. 20: Iss. 6, Article 24. https://doi.org/10.21123/bsj.2023.8037

Anwar, T., Quareshi, H., Fatima, A., Sattar, K., Albasher, G., Kamal, A., Ayaz, A. & Zaman, W. (2023) *Citrus sinensis* peel oil extraction and evaluation as an antibacterial and antifungal agent. Microorganisms, 11, 1662. p. 1-13 https://doi.org/10.3390/microorganisms11071662

Aranda-Ledesma, N., González-Hernández, M., Rojas, R., Paz-González, A., Rivera, G., Luna-Sosa, B. & Martínez-Ávila, G. (2022) Essential oil and polyphenolic compounds of *Flourensia cernua* leaves: chemical profiling and functional properties. Agronomy, 12, 2274. p. 1-19. https://doi.org/10.3390/agronomy12102274

Aranda-Ledesma NE, Rojas-Molina R, Robledo-Jiménez CL, Martínez-Ávila GCG (2024) Fitoquímicos antioxidantes: el caso de *Jatropha dioica*, *Flourensia cernua*, *Larrea tridentata*, *Turnera diffusa* y *Euphorbia antisiphylitica*. TECTZAPIC: Revista Académico-Científica 10(1):55–68. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9764440

Arruda, F., Lima, A., Janeiro, A., Rodrigues, T., Baptista, J., Rosa, JS., Machado, A., Figueiredo, AC. & Lima, E. (2025). Azorean Cryptomeria japonica immature female cones essential oil: Effect of hydrodistillation fractionation on the chemical composition and in vitro antifungal activity against Thielaviopsis paradoxa. Industrial Crops and Products, Volume 231, 121182.
https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121182.

Bahri, F., Szumny, A., Figiel, A., Bahri, Y., Włoch, A., Bażanów, B., Chwirot, A., Gębarowski, T., Bugno, P., Bahri, E. & Benabdeloued, R. (2025) Chemical composition, biological activity, and *in vivo* toxicity of essential oils extracted from mixtures of plants and spices. Molecules, 30(23), 4579. https://doi.org/10.3390/molecules30234579

Brah, A.S., Obuah, C. & Adokoh, C.K. (2024). Innovations and modifications of current extraction methods and techniques of citrus essential oils: a review. Discov Appl Sci 6, 460. https://doi.org/10.1007/s42452-024-06100-z

Castellanos, L., Olivas, N., Ayala-Soto, J., De la O, C., Zermeño, M., Sandoval, F. & Hernández-Ochoa, L. (2020) *In vitro* and *in vivo* antifungal activity of clove (*Eugenia caryophyllata*) and pepper (*Piper nigrum* L.) essential oils and functional extracts against *Fusarium oxysporum* and *Aspergillus* niger in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). International Journal of Microbiology. ID 1702037, p. 1-8. https://doi.org/10.1155/2020/1702037

Castro, J., Endo, E., Souza, M., Zanqueta, E., Polonio, J., Pamphile, J., Ueda-Nakamura, T., Nakamura, C., Dias, B. & De Abreu, B. (2017) Bioactivity of essential oils in the control of *Alternaria alternata* in dragon fruit (*Hylocereus undatus* Haw.). Industrial Crops and Products, 97 p. 101–109. http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.0070926-6690

Chang, Y., Harmon, P., Treadwell, D., Carrillo, D., Sarkhosh, A. & Brecht, J. (2022). Biocontrol potential of essential oils in organic horticulture systems: from farm to fork. Front. Nutr. 8:805138. https://doi.org/10.3389/fnut.2021.805138

Chen, C., Cai, N. Chen, J. & Wan, C. (2019) Clove essential oil as an alternative approach to control postharvest blue mold caused by *Penicillium italicum* in citrus fruit. Biomolecules, 9, 197. https://doi.org/10.3390/biom9050197

De la O-Cuevas, E., Gallegos-Flores, P., Ortega_Sigala, J.J., Tototzintle-Huitle, H., Saniger, J.M. & Esparza-Ibarra, E.L. (2025). Biophysical and structural modifications on human erythrocytes induced by ethanolic extracts of *Ruta graveolens*, *Artemisia ludoviciana,* and *Lippia graveolens*: a study by ATR-FTIR

spectroscopy. Royal Society of Chemistry, 15, p. 39223–39234. https://doi.org/10.1039/d5ra06459g

El-Nagar, A., Elzaawely, A. A., Xuan, T. D., Gaber, M., El-Wakeil, N., El-Sayed, Y., & Nehela, Y. (2022). Metal complexation of bis-chalcone derivatives enhances their efficacy against fusarium wilt disease, caused by *Fusarium equiseti*, via induction of antioxidant defense machinery. Plants, 11(18), 2418. https://doi.org/10.3390/plants11182418

Ibrahim, S. (2019) Essential oil nanoformulations as a novel method for insect pest control in horticulture. Horticultural Crops. p. 1-14 http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80747

Jasso de Rodríguez, D., Salas-Méndez, E., Rodríguez-García, R., Hernández-Castillo, F., Díaz-Jiménez, M., Sáenz-Galindo, A., González-Morales, S., Flores-López, M., Villarreal-Quintanilla, J., Peña-Ramos, F. & Carrillo-Lomelí, D. (2017) Antifungal activity *in vitro* of ethanol and aqueous extracts of leaves and branches of *Flourensia* spp. against postharvest fungi. Industrial Crops and Products, 107, p. 499-508. http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.054

Kayiran, S., Bolgen, U., Akgül, E., Kadiroglu, P., Cengiz, N., Cevikelli, T., Onan, D., Esra Ozkan, E., Bozdogan, G., Boga, M., Ozogul, Y., Esatbeyoglu, T. & Ozogu, F. (2025) Chemical composition, characterization, and antimicrobial properties of *Thymbra spicata* essential oil-based nanoemulsions and its application on curd cheese. Frontiers in Nutrition, 12, 1615832. https://doi.org/10.3389/fnut.2025.1615832

Khalil, H., & Abo-Elyousr, K. (2019) Antibacterial activity of some essential oils on bacterial spot disease of tomato plant caused by *Xanthomonas axonopodis* pv. *vesicatoria*. Int. J. Phytopathol. 08 (02). p 53-61 https://doi.org/10.33687/phytopath.008.02.2967

Mahato, N., Sharma, K., Koteswararao, R., Sinha, M., Baral, E. & Hwan, M. (2017) Citrus essential oils: Extraction, authentication and application in food preservation, Critical Reviews in Food Science and Nutrition. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 59, 611-625 https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1384716

Maurya, A., Yadav, A., Soni, M., Paul, K., Banjare, U., Jha, M., Dwivedy, A. & Dubey, N. (2024) Nanoencapsulated essential oils for post-harvest preservation of stored cereals: a review. Foods, 13, 4013. p. 1-24. https://doi.org/10.3390/foods13244013

McClements, D. (2021) Advances in edible nanoemulsions: Digestion, bioavailability, and potential toxicity. Progress in Lipid Research. 81, 101081.

https://doi.org/10.1016/j.plipres.2020.101081

Oliveira, J., Parisi, M., Baggio, J., Silva, P., Paviani, B., Spoto, M. & Gloria, E. (2019) Control of *Rhizopus stolonifer* in strawberries by the combination of essential oil with carboxymethylcellulose. International Journal of Food Microbiology. 292, p. 150-158. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2018.12.014

Rezende, J., Fernandes, C., Costa, A., Santos, L., Vicente, F., Sperandio, E., Souchie, E., Colli, Crotti, A. Miranda, M. (2020) Antifungal potential of essential oils from two varieties of *Citrus sinensis* (lima orange and bahia navel orange) in postharvest control of *Rhizopus stolonifer* (Ehrenb.: Fr.) Vuill. Food Science and Technology, 40 (2) p. 405-409. https://doi.org/10.1590/fst.30519

Torres-Martínez, R., García-Rodríguez, Y., Ramírez-Ortiz, M., Hernández-Delgado, T., Delgado, G. & Espinosa-García, F. (2025) Antibacterial essential oils as adjuvants to inhibit antibiotic resistance in multidrug-resistant Bacteria. Chemistry & Biodiversity, 22:e202500405. https://doi.org/10.1002/cbdv.202500405

Tovar, C., Chaves-Lopez, C., Serio, A., Rossi, C. & Paparella, A. (2018) Chitosan coatings enriched with essential oils: Effects on fungal decay of fruits and mechanisms of action. Trends in Food Science & Technology. Volume 78, p. 61-71. http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.019

Wang, J. & Zhuang, S. (2022) Chitosan-based materials: Preparation, modification and application. Journal of Cleaner Production, 355, 131825 p. 1-25. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131825

Yu, J., Wang, D., Geetha, N., Khawar, K., Jogaiah, S. & Mujtaba, M. (2021) Current trends and challenges in the synthesis and applications of chitosan-based nanocomposites for plants: A review. Carbohydrate Polymers, 261, 117904. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117904

Diseño preliminar de una cámara térmica para la simulación de estrés abiótico

Zayd Eliud Rangel-Nava[1*]; Héctor Flores-Breceda[1]; Sugey Ramona Sinagawa-García[1]; Daniela Saraí Rico-Costilla[2]; Urbano Luna Maldonado[1]; Alejandro Isabel Luna-Maldonado[1].
[1]Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399.
[2]Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Nuevo León. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050.
*Email: zayd.rangelnv@uanl.edu.mx

Resumen. El control de la temperatura es importante para el desarrollo de estudios de estrés abiótico por temperatura elevada en germinados. El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un sistema de monitoreo y control térmico para una cámara de control ambiental orientada a la simulación de estrés térmico en germinados. Para ello, se realizó el diseño conceptual de la cámara, el desarrollo del software de control utilizando Arduino IDE, el diseño del circuito electrónico y la implementación y validación funcional del sistema. El código desarrollado permitió la adquisición de datos de temperatura y humedad mediante un sensor DHT11, la visualización de las variables ambientales en una pantalla LCD y el control automático de una resistencia térmica y un ventilador mediante umbrales de temperatura configurables. La validación funcional confirmó la correcta adquisición de las variables ambientales y la respuesta de los actuadores conforme a la lógica de control planteada. Asimismo, el sistema demostró una respuesta térmica estable alrededor de la temperatura de consigna, con un comportamiento reproductible. Los resultados obtenidos constituyen una base preliminar funcional para una cámara de control ambiental y su próxima evaluación experimental.
Palabras clave: Estrés abiótico, control térmico, Arduino, cámara de control ambiental, germinados.

Abstract. Temperature control is essential for conducting studies on abiotic stress caused by elevated temperatures in sprouts. The objective of this study was to develop a thermal monitoring and control system for an environmental control chamber designed to simulate thermal stress in sprouts. To this end, the conceptual design of the chamber, the development of the control software using the Arduino IDE, the design of the electronic circuit, and the implementation and functional validation of the system were carried out. The developed code enabled the acquisition of temperature and humidity data using a DHT11 sensor, the visualization of environmental variables on an LCD display, and the automatic control of a heating element and a fan through configurable temperature thresholds. Functional validation confirmed the proper acquisition of environmental variables and the response of the actuators according to the proposed control logic. Furthermore, the system demonstrated a stable thermal response around the setpoint temperature, with reproducible behavior. The results obtained provide a preliminary functional basis for an environmental control chamber and its subsequent experimental evaluation.
Keywords: abiotic stress, thermal control, Arduino, environmental chamber, sprouts.

Introducción

El cambio climático es asociado al incremento de la temperatura, representa uno de los principales factores de estrés abiótico que afectan el desarrollo, rendimiento y calidad de los cultivos. Las altas temperaturas alteran procesos fisiológicos, bioquímicos y metabólicos esenciales en las plantas, disminuyendo la germinación, el crecimiento y la productividad agrícola (Ramzan *et al.*, 2026; Mirón *et al.*, 2023; Janni *et al.*, 2024). Además, diversos estudios estiman que por cada incremento de 1 °C en la temperatura pueden registrarse reducciones de entre 3 y 7 % en el rendimiento de los principales cultivos (Challinor *et al*., 2014; Zhao *et al.*, 2017; Tran *et al.*, 2025).
Ante este escenario, resulta indispensable desarrollar herramientas experimentales que permitan evaluar la respuesta de las plantas bajo condiciones ambientales controladas.

Las cámaras de control ambiental constituyen una herramienta fundamental para la investigación del estrés abiótico, ya que permiten evaluar la respuesta fisiológica de las plantas bajo estímulos ambientales específicos como la temperatura y humedad sin la interferencia de factores externos, favoreciendo también la reproducibilidad de los experimentos (Langhans & Tibbitts, 1997; Sánchez *et al.*, 2020; Guney & Cakir 2025). Sin embargo, los equipos comerciales suelen representar una inversión elevada debido a sus sistemas especializados de monitoreo y control, lo que limita su disponibilidad en diversos laboratorios de investigación (Sánchez *et al.*, 2020; Darehshouri *et al.*, 2020). En este contexto, el desarrollo de sistemas automatizados basados en plataformas de hardware abierto y componentes electrónicos de bajo costo constituye una alternativa viable para la implementación de cámaras ambientales adaptadas a las necesidades de la investigación (Sánchez *et al.*, 2020; Ribeiro *et al.*, 2021).

El presente trabajo corresponde al avance del primer objetivo específico de la investigación, el cual consiste en el desarrollo de una cámara para la simulación de estrés abiótico en germinados mediante el control de la temperatura. Para ello, se aborda el diseño conceptual de la cámara, el desarrollo del software para el monitoreo y control de temperatura, el diseño del circuito electrónico y la implementación y validación funcional del sistema. Este desarrollo constituye la base experimental que permitirá, en etapas posteriores de la investigación, evaluar la respuesta de germinados de soya sometidos a condiciones controladas de estrés térmico.

Objetivo General.
Desarrollar un sistema de monitoreo y control térmico para una cámara de control ambiental orientada a la simulación de estrés térmico en germinados.

Hipótesis
El desarrollo de un sistema automatizado de monitoreo y control térmico proporcionará la base tecnológica para regular la temperatura en una cámara de control ambiental con la estabilidad requerida para la simulación de estrés térmico en condiciones controladas.

Objetivos Específicos

1. Diseñar conceptualmente una cámara para la simulación de estrés abiótico.
2. Desarrollar el software para la automatización del monitoreo y control de temperatura de la cámara.
3. Diseñar el circuito electrónico para el sistema de monitoreo y control de temperatura de la cámara.
4. Implementar y validar el circuito electrónico mediante pruebas de respuesta del sistema.

Materiales y Métodos

Ubicación del estudio

Esta investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la Facultad de Agronomía (FA) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), teniendo como área principal de trabajo el Laboratorio de Ingeniería.

Materiales Experimentales

El material de construcción de sistema se adquirió en la tienda STEREN.

- Arduino Uno
- Pantalla LCD 16x2
- Módulo adaptador I2C
- Sensor de Temperatura y Humedad DHT11
- Módulo Relé (1 canal)
- Resistencia de Silicona 12V / 20W (50mm x 150mm)
- Transistor NPN (TIP120 / Mosfet)
- Ventilador de 12V
- Diodo 1N4007
- Resistencia 220 Ω
- Protoboard
- Fuente de Poder 12V / 10ª
- Juego de Cables Jumpers Dupont H-H, H-M, M-M

Diseño Conceptual de la Cámara

El diseño conceptual de la cámara para la simulación de estrés abiótico se desarrolló con base en los requerimientos funcionales necesarios para generar condiciones de temperatura controlada en un rango de 20 a 40 °C, adecuado para la evaluación de germinados de soya bajo estrés térmico. Para ello, se establecieron las características que debía cumplir el sistema, considerando la capacidad para alojar las muestras experimentales, el aislamiento térmico, la circulación interna del aire y la integración de un sistema de monitoreo y control de temperatura.

Posteriormente, se definió la distribución preliminar de los componentes principales, incluyendo el sistema de calentamiento, el sistema de ventilación, el sensor de temperatura y humedad, las bandejas para las muestras y el sistema electrónico de control. La disposición de estos elementos se planteó con el propósito de favorecer una distribución homogénea de la temperatura dentro de la cámara y facilitar el monitoreo de las condiciones internas.

Finalmente, se elaboró una propuesta de diseño conceptual que sirvió como base para el desarrollo del circuito electrónico y del sistema de control.

Desarrollo de Software

El software para el sistema de control en la cámara fue desarrollado utilizando el entorno de programación de Arduino IDE, empleando el lenguaje de programación basado en C/C++ compatible con la placa Arduino Uno. El algoritmo fue diseñado para adquirir las lecturas del sensor de temperatura y humedad DHT11,

visualizándolas en una pantalla LCD, procesar la información obtenida y controlar mediante un módulo relevador la resistencia de Silicona 12V / 20W, y mediante un transistor NPN (TIP120 / Mosfet) el funcionamiento del ventilador.

El desarrollo del programa se realizó de manera modular, integrando progresivamente las funciones correspondientes a la adquisición de datos, visualización de las variables de operación y el control de los actuadores. Una vez concluido el desarrollo del algoritmo, el código fue compilado en el entorno Arduino IDE y cargado en una placa de Arduino Uno para su posterior evaluación.

Diseño del Circuito Electrónico de la Cámara

El circuito electrónico se elaboró inicialmente de forma esquemática a mano con el propósito de definir la interconexión de los componentes y verificar la lógica del funcionamiento del sistema. Después, el diseño fue digitalizado y desarrollado en el software KiCad 2026, donde se obtuvo el esquema electrónico formal que sirvió como base para la implementación del monitoreo y control de temperatura.

Implementación y Validación del Funcionamiento del Circuito Electrónico

Una vez concluido el diseño del circuito electrónico, se procedió a su implementación mediante la conexión e integración de los componentes del sistema, incluyendo la placa Arduino Uno, el sensor de temperatura y humedad, el módulo relevador, la resistencia calefactora, el ventilador y la pantalla LCD. Posteriormente se realizaron pruebas de funcionamiento para verificar la correcta comunicación entre los dispositivos, la adquisición de la temperatura, visualización de la información y la activación de los actuadores de acuerdo con la lógica de control establecida en el software. La validación consistió en verificar que el circuito ejecutara las funciones establecidas en el software para el monitoreo y control de la temperatura de la cámara.

Evaluación Preliminar de la Respuesta Transitoria y Estabilidad Térmica

Se llevaron a cabo dos pruebas de funcionamiento de la cámara en días distintos, con una duración de 60 minutos cada una. Durante el periodo de prueba se registraron valores de temperatura y humedad cada 2 minutos. La temperatura programada para la operación se estableció en 35°C.

Para evaluar la respuesta transitoria, se consideraron los datos de la temperatura inicial hasta alcanzar los 35°C junto al tiempo. A partir de estos datos se obtuvo una ecuación de regresión lineal simple, cuya pendiente se utilizó para estimar la tasa de incremento de temperatura (°C/min) durante la etapa de calentamiento.

Alcanzada la temperatura programada, se continuó capturando los datos por el tiempo restante de la prueba para observar el comportamiento y estabilidad de la temperatura.

Resultados y Discusión

Diseño Conceptual de la Cámara

El diseño conceptual de la cámara para la simulación de estrés abiótico considera las vistas frontal, trasera y laterales, así como

la distribución de los componentes internos (Figura1). La estructura cuenta con unas dimensiones de 43 x 43 x 49 cm (ancho x profundidad x altura) e integra una pantalla LCD para la visualización de los datos de temperatura y humedad al momento, también cuenta con un interruptor de encendido y una salida posterior destinada a la alimentación alterna del sistema.

El área interior alberga 2 bandejas de alojamiento para muestras experimentales, una resistencia de silicona ubicada en la parte inferior como fuente de calentamiento, un ventilador de extracción como sistema de emergencia en caso de superar la temperatura programada y un sensor de temperatura y humedad DHT11 instalado en la parte superior lateral del compartimento para el monitoreo de las condiciones internas. La configuración propuesta integra los principales elementos electrónicos requeridos para el desarrollo del sistema de control de estrés térmico, constituyendo la base para la posterior implementación de la cámara en las etapas posteriores de la investigación.

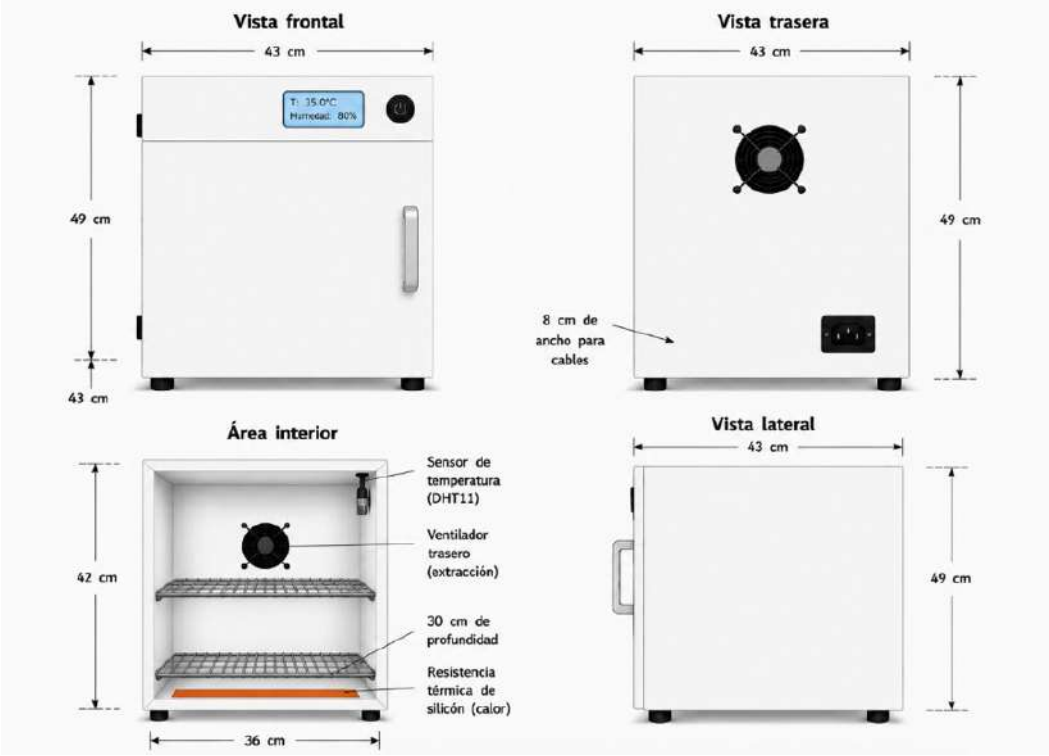


Figura 1. Diseño conceptual de la cámara para la simulación de estrés abiótico.

Diseñar y desarrollar cámaras experimentales para la simulación de condiciones ambientales controladas representa una alternativa prometedora al alto costo de los equipos comerciales. Debido a esto, diversos investigadores han optado por diseñar y construir sus propios equipos de control abiótico, adaptados a los requerimientos de su investigación; Darehshouri *et al.* (2020) mencionan que las cámaras ambientales son de importancia en gran variedad de experimentos en diferentes disciplinas, por lo que desarrollaron una cámara con dimensiones de 1790x 970x 520 mm, para simular clima cálido con un rango de 15°C - 50°C por menos de 900 euros con lámparas infrarrojas como fuentes de calor.

Por otra parte, Sánchez *et al.* (2020) desarrollaron una cámara con un sistema de control de temperatura utilizando un código abierto como una alternativa de bajo costo frente a los equipos comerciales. De manera similar a la presente investigación, el diseño que propusieron integra un sistema térmico a base de componentes electrónicos de amplia disponibilidad con el propósito de desarrollar una plataforma adaptable a sus necesidades experimentales.

Desarrollo de Software

El algoritmo de control fue desarrollado en el entorno Arduino IDE empleando el lenguaje de programación C/C++, compatible con la placa Arduino Uno. El programa integra la adquisición de datos del sensor de temperatura y humedad DHT11, visualización de variables en pantalla LCD cada 1.5 segundos y controla la activación de la resistencia térmica mediante un módulo relevador, así como el funcionamiento del ventilador a través de un transistor TIP120.

En la Figura 2 se presenta una captura del algoritmo desarrollado y compilado en Arduino IDE, en el se establecen los valores de operación para la activación del sistema.

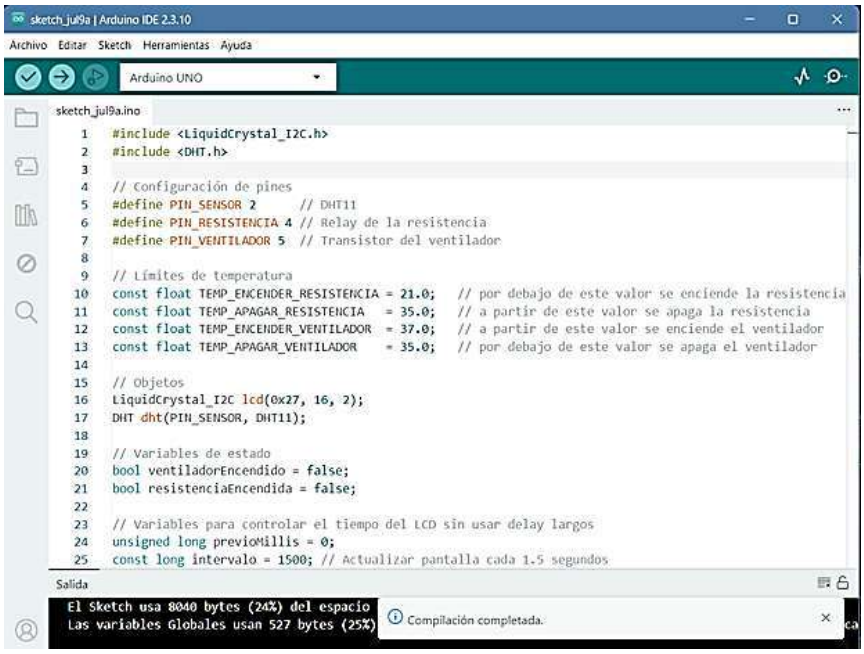


Figura 2. Interfaz del entorno Arduino IDE con el código compilado desarrollado para el sistema de control. de temperatura.

La lógica del monitoreo y control del algoritmo es basada en umbrales de temperatura. Cuando la temperatura detectada es inferior a 21°C, el sistema activa la resistencia térmica para incrementar la temperatura. Una vez alcanzados los 35°C, la resistencia se desactiva. El ventilador se activará si se supera la temperatura de 37°C, extrayendo calor hasta regular la temperatura. Los umbrales pueden modificarse en el algoritmo de acuerdo con las condiciones ambientales del sitio de operación o con los requerimientos experimentales de cada ensayo.

La utilización de plataformas de hardware abierto, como Arduino, se ha incrementado en el desarrollo de sistemas automatizados para aplicaciones científicas debido a su bajo costo, facilidad de programación y compatibilidad con una amplia variedad de sensores y actuadores. Sánchez *et al.* (2020) implementaron un sistema de control de temperatura basado en una placa Arduino Uno, destacando la versatilidad de esta plataforma para el desarrollo de sistemas de monitoreo y control. Por su parte, Apollon *et al.* (2022) desarrollaron un sistema automatizado de adquisición de datos empleando un microcontrolador ATmega2560 para el monitoreo en tiempo real de variables experimentales. De manera similar, en el presente trabajo se desarrolló un algoritmo en Arduino IDE para integrar el monitoreo de variables ambientales y el control automatizado de los dispositivos electrónicos requeridos para el funcionamiento del sistema.

Diseño del Circuito Electrónico de la Cámara

La Figura 3 presenta el diagrama esquemático desarrollado en el software KiCAD del sistema electrónico de control de temperatura para la cámara de simulación de estrés abiótico. El circuito integra una placa Arduino Uno como unidad de procesamiento, un sensor DHT11 para la adquisición de temperatura y humedad, una pantalla LCD para la visualización de las variables ambientales, un módulo relevador para el accionamiento de la resistencia térmica y un transistor TIP120 para el control del ventilador.

El diseño electrónico permite la comunicación entre los dispositivos de adquisición, procesamiento y control, proporcionando la infraestructura necesaria para la automatización del sistema de regulación térmica propuesto.

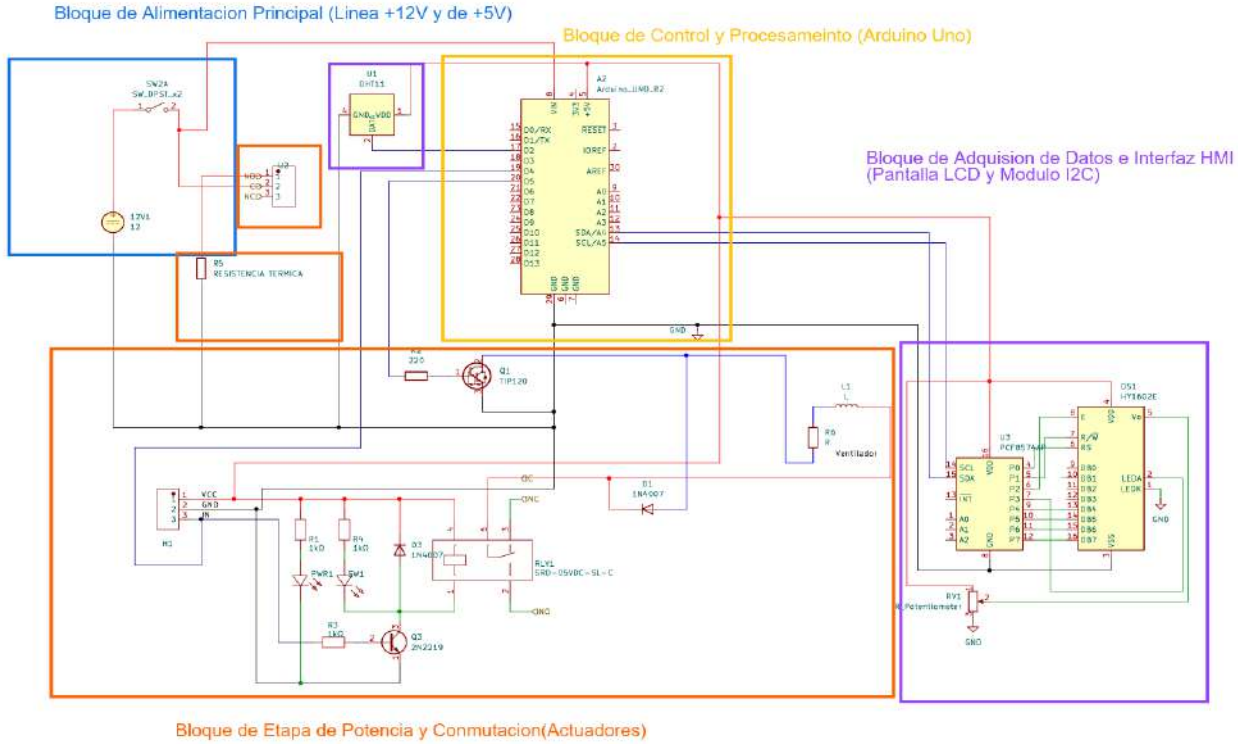


Figura 3. Diagrama esquemático del sistema electrónico para el monitoreo y control de temperatura.

Diversos sistemas de automatización desarrollados con plataformas Arduino emplean una arquitectura basada en la integración de sensores, microcontroladores y actuadores para el control de variables ambientales (Sánchez *et al.*, 2020; Apollon *et al.*, 2022). En concordancia con este enfoque, el diagrama esquemático del circuito electrónico se diseñó para responder a los requerimientos funcionales del sistema de control de temperatura, integrando los elementos necesarios para la adquisición de datos, el procesamiento de la información y el accionamiento de los dispositivos de calentamiento y ventilación. Asimismo, la arquitectura propuesta separa la etapa de control de la etapa de potencia mediante el uso de un módulo relevador y un transistor de conmutación, lo que contribuye a una operación más segura del sistema y proporciona flexibilidad para futuras modificaciones o la incorporación de nuevos componentes.

Implementación y validación del Funcionamiento del Circuito Electrónico

El sistema electrónico fue implementado en una plataforma de pruebas para evaluar su correcta funcionalidad. En el circuito electrónico se integró la placa Arduino Uno, el sensor de temperatura DHT11, la pantalla LCD, el módulo relevador, la resistencia térmica y el ventilador, como se observa en la Figura 4.

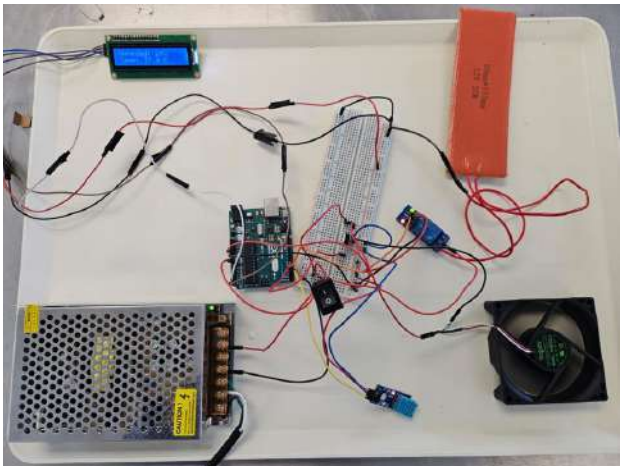


Figura 4. Sistema electrónico implementado para la validación funcional del algoritmo de control de temperatura, integrado por una placa Arduino Uno, Sensor DHT11, pantalla LCD, módulo relevador, resistencia calefactora y ventilador.

La pantalla LCD mostró las lecturas de temperatura y humedad recolectadas por el sensor DHT11. Asimismo, se observa en la Figura 4, que el led indicador del módulo relevador se encendió, evidenciando la activación del sistema de calentamiento acorde a la programación establecida para la prueba (encender a 21°C y apagar 35°C). Durante la prueba se incrementó de manera controlada la temperatura del sistema hasta superar el umbral establecido en el algoritmo (35°C), con el propósito de verificar la respuesta del sistema de control, bajo estas condiciones, el controlador activó el ventilador para favorecer la regulación de temperatura, actuando acorde a lo programado.

La Figura 5 muestra la respuesta del sistema de monitoreo durante el proceso de calentamiento, observándose un incremento progresivo de la temperatura, acompañado de una disminución de la humedad relativa. Las lecturas fueron visualizadas en tiempo real en la pantalla LCD, evidenciando la correcta adquisición y procesamiento de los datos por parte del sistema de control.

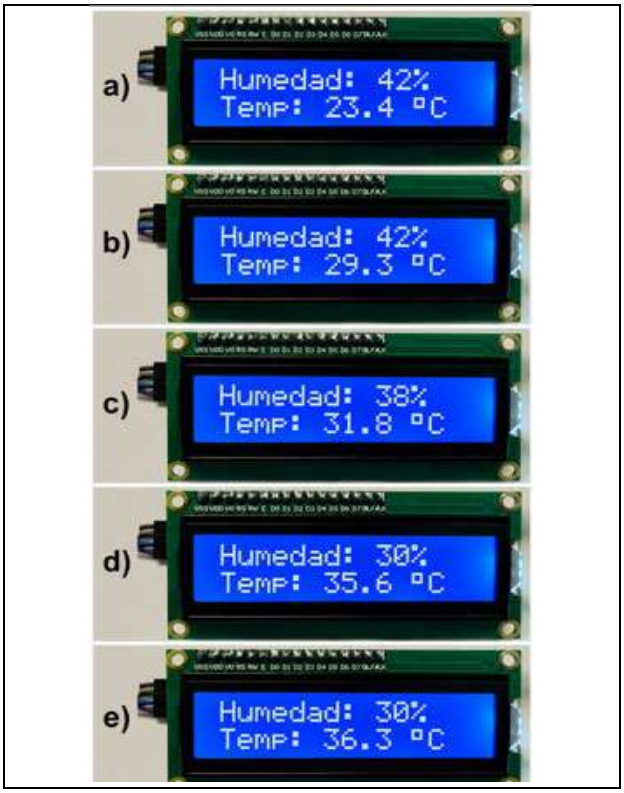


Figura 5. Lecturas progresivas registradas por la pantalla LCD durante la validación funcional de sistema electrónico: a)23.4°C; b)29.3°C; c) 31.8°C; d)35.6°C; e)36.3°C.

La ejecución del circuito electrónico planteado permitió validar el funcionamiento conjunto del hardware y del software desarrollados para el monitoreo y control de temperatura. La integración del sensor de temperatura y humedad DHT11, la placa Arduino Uno, el módulo relevador, la resistencia calefactora, el ventilador y la pantalla LCD permitió comprobar la correcta adquisición y procesamiento de las variables ambientales, así como la activación de los dispositivos de control conforme a los umbrales establecidos en el algoritmo. Este comportamiento demuestra la correcta interacción entre los componentes electrónicos y el programa desarrollado para la automatización del sistema.

Múltiples sistemas automatizados basados en plataformas Arduino integran sensores, microcontroladores y actuadores para el monitoreo y control de variables ambientales (Sánchez *et al.*, 2020; Ribeiro *et al.* 2021; Apollon *et al.*, 2022). En concordancia con este enfoque, el sistema desarrollado en el presente trabajo demostró una respuesta adecuada durante la validación funcional. Además, presenta la posibilidad de modificar los valores umbral directamente en el código desarrollado, proporcionando la flexibilidad necesaria para adaptar el sistema a diferentes condiciones experimentales.

Evaluación Preliminar de la Respuesta Transitoria y Estabilidad Térmica en Cámara

La temperatura presentó un comportamiento lineal ascendente durante el periodo de calentamiento, con una tasa de aumento de 0.14 °C/min (Figura 6). Los 35 °C programados se alcanzaron en el minuto 34 del día uno y 32 del día dos, continuando con la prueba hasta el minuto 60 en donde se observó que durante ese periodo en ambos días la temperatura se mantuvo oscilando en un rango de 34.7°C y 35.2°C como se observa en la Figura 7. En cuanto la humedad relativa (HR) los resultados se comportaron de manera similar (Figura 8) reduciendo la humedad relativa en 9 y 6 puntos porcentuales, respectivamente, siendo esta variación consecuencia de factores ambientales en ambos días. La similitud entre las dos pruebas realizadas resulta relevante debido a que se observa una reproducibilidad en el control térmico, esencial para una futura ejecución experimental.

En sistemas experimentales con control de temperatura, la estabilidad alrededor del valor de referencia constituye un aspecto fundamental para asegurar reproductividad experimental (Sánchez *et al.,* 2020). De manera similar se han desarrollado cámaras ambientales de bajo costo para aplicaciones agrícolas que integran sensores y actuadores controlados con Arduino, destacando la utilidad de estas herramientas para el monitoreo y regulación de variables ambientales en condiciones controladas (Darehshouri *et al.,* 2020; Ribeiro *et al*., 2021; Guerrero *et al*., 2025).



Figura 6. Periodo de calentamiento.

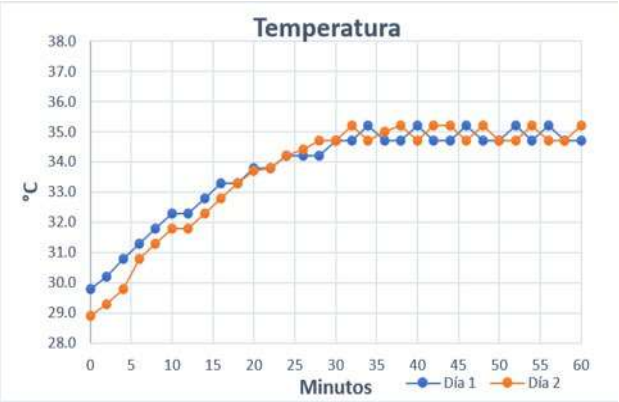


Figura 7. Prueba de control de temperatura Día uno y dos.

Conclusión

Se desarrolló la fase preliminar de un sistema de monitoreo y control térmico para una cámara de control ambiental, mediante el diseño conceptual de la cámara, el desarrollo del software de control, el diseño del circuito electrónico, su implementación y evaluación preliminar. Los resultados obtenidos demostraron la correcta adquisición de las variables ambientales y la respuesta de los actuadores de acuerdo con la lógica de control programada. Asimismo, el sistema demostró una respuesta térmica estable alrededor de la temperatura de consigna, con un comportamiento reproductible de manera preliminar entre las pruebas realizadas. En conjunto, se presenta un sistema base preliminar funcional de control ambiental destinado a la simulación de estrés abiótico.

Agradecimientos

A mis asesores, al director, M.C. Carlos A. Hernández Martínez y la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación.

Referencias Bibliográficas

Apollon, W., Luna-Maldonado, A. I., Vidales-Contreras, J. A., Rodríguez-Fuentes, H., Gómez-Leyva, J. F., Kamaraj, S.-K., Maldonado-Ruelas, V. A., & Ortiz-Medina, R. A. (2022). Performance of electrical energy monitoring data acquisition system for plant-based microbial fuel cell. Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences, 10(2), 387–395.

Challinor, A. J., Watson, J., Lobell, D. B., Howden, S. M., Smith, D. R., & Chhetri, N. (2014). A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation. Nature Climate Change, 4, 287–291.

Darehshouri, S., Michelsen, N., Schüth, C., & Schulz, S. (2020). A low-cost environmental chamber to simulate warm climatic conditions. Vadose Zone Journal, 19(1).

Guerrero-Sánchez, J., Olvera-Olvera, C. A., Solis-Sánchez, L. O., Martínez-Blanco, M. D. R., López-Martínez, M. d. J., Castañeda-Miranda, C. L., Soto-Zarazúa, G. M., & Díaz-Flórez, G. (2025). Design and Implementation of a Low-Cost Controlled-Environment Growth Chamber for Vegetative Propagation of MotherPlants. *AgriEngineering*, *7*(6), 177.

Guney, A., & Cakir, O. (2025). Design and temperature control of a novel aeroponic plant growth chamber. Electronics, 14(14), 2801.

Janni, M., Maestri, E., Gullì, M., Marmiroli, M., & Marmiroli, N. (2024). Plant responses to climate change, how global warming may impact on food security: A critical review. Frontiers in Plant Science, 14.

Langhans, R. W., & Tibbitts, T. W. (Eds.). (1997). Plant growth chamber handbook. Iowa State University.

Mirón, I. J., Linares, C., and Díaz, J. (2023). The influence of climate change on food production and food safety. Environ. Res. 216, 114674.

Ramzan, M. T., Nawab, A., Razaq, L., *et al.* (2026). Insights into plant abiotic stress physiology through conventional and nonconventional approaches. Discover Agriculture, 4, 33.

Ribeiro, R. R., Bauer, E., & Lameiras, R. (2021). HIGROTERM: An open-source and low-cost temperature and humidity monitoring system for laboratory applications. Inventions, 6(4), 84.

Sánchez, C., Dessì, P., Duffy, M., & Lens, P. N. L. (2020). OpenTCC: An open source low-cost temperature-control chamber. HardwareX, 7, e00099.

Tran, B.-L., Tseng, W.-C., & Chen, C.-C. (2025). Climate change impacts on crop yields across temperature rise thresholds and climate zones. Scientific Reports, 15, 23424.

Zhao, C., Liu, B., Piao, S., Wang, X., Lobell, D. B., Huang, Y., *et al.* (2017). Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. Proceedings of the National Academy of Sciences, 114, 9326–9331.

Cuantificación de minerales, oxalatos y estandarización de un prototipo digestivo *in vitro* para harina de nopal cultivar Villanueva

Mayra Gómez-Alejo[1*]; Rigoberto E. Vázquez-Alvarado[1]; Emilio Olivares-Sáenz[1]; Alejandro Isabel Luna-Maldonado[1]; Carlos Alberto Garza-Alonso[1]; Aurora de Jesús Garza-Juárez[2]; Perla Giovanna Silva-Flores[2].
[1]Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399.
[2]Facultad de Medicina, UANL. Av. Dr. José Eleuterio González # 235, Col. Mitras Centro, Monterrey, Nuevo León, México. C.P. 64460. Tel. (81) 83 294154.
*Email: mayra.gomezal@uanl.edu.mx

Resumen. El nopal (*Opuntia ficus Indica*) es una planta de la familia de las cactáceas de gran importancia en México por su amplia distribución en zonas áridas y semiáridas, así como su valor nutrimental y funcional (Torres *et al*., 2023). El nopal verdura ha incrementado su aprovechamiento en la industria alimentaría en la elaboración de productos y harina de nopal, gracias a sus componentes destacándose su fracción mineral, caracterizada por su contribución en magnesio (Mg), potasio (K) y calcio (Ca) (Quintero *et al*., 2020). Sin embargo, la biodisponibilidad de este mineral está condicionada por la presencia del ácido oxálico ($C_2H_2O_4$), el cual puede formar cristales insolubles (Oxalato) limitando su absorción metabólica (Zayed *et al*., 2025). La morfología de los cristales de los oxalatos está dentro de los tejidos de la planta y se concentran en forma de whewellita (Oxalato de calcio monohidratado) o de Weddllita (Oxalato de calcio dihidratado) según autores Zuñiga *et al*., (2020). La harina de nopal de la variedad Villanuva se destacó las concentraciones de macrominerales como potasio (K) 4.17 % y calcio (Ca) 2.74 %, así como niveles importantes de manganeso (Mn) 1559.52 ppm y fierro (Fe) 69.37 ppm como microminerales. El objetivo de este avance semestral de investigación fue determinar la concentración de la harina de nopal cultivar Villanueva: macro y micro minerales, como el oxalato de calcio, diseñar y estandarizar con sensores de pH y temperatura el prototipo gastrointestinal *in vitro* siguiendo la metodología internacional INFOGEST.
Palabras clave. Minerales, oxalatos, calcio, acido oxálico y gastrointestinal

Abstract. The tender prickly pear (*Opuntia ficus-indica*) is a plant belonging to the Cactaceae family, which is of great importance in México due to its widespread distribution in arid and semi-arid regions, as well as its nutritional and functional value (Torres *et al*., 2023). The use of tender prickly pear as a vegetable has increased within the food industry ranging from its inclusion in various products to the production of tender prickly pear flour thanks to its specific components, most notably its mineral content, which provides significant amounts of magnesium (Mg), potassium (K), and calcium (Ca) (Quintero *et al*., 2020). However, the bioavailability of these minerals is influenced by the presence of oxalic acid (C_2H2O_4), which can form insoluble crystals (oxalates), thereby limiting metabolic absorption (Zayed *et al*., 2025). According to Zuñiga *et al*. (2020), these oxalate crystals are found within the plant tissues, primarily in the form of whewellite (calcium oxalate monohydrate) or weddellite (calcium oxalate dihydrate). The tender prickly pear flour from the 'Villanueva' variety was found to contain high concentrations of macrominerals, specifically potassium (K) at 4.17% and calcium (Ca) at 2.74%, as well as significant levels of microminerals,

including manganese (Mn) at 1559.52 ppm and iron (Fe) at 69.37 ppm. The objective of this semi-annual research progress report was to determine the composition of tender prickly pear flour from the 'Villanueva' cultivar specifically its macronutrients, micronutrients, and calcium oxalates and to design and standardize an *in vitro* gastrointestinal prototype, equipped with pH and temperature sensors, following the international INFOGEST methodology.
Keywords: Minerals, oxalates, calcium, oxalic acid, and gastrointestinal

Introducción

El nopal (*Opuntia ficus Indica*) es una planta de la familia de las cactáceas de gran importancia en México, gracias a su variedad de especies, su amplia disponibilidad en zonas áridas y semiáridas, por su valor nutrimental y funcional (Torres *et al*., 2023). Sin embargo, en los últimos años el uso y aprovechamiento del nopal ha incrementado desde la producción de tuna, forraje, colorante de grana cochinilla y producción de nopal verdura Reyes *et al*. (2023), del cual su investigación y desarrollo ha incrementado con la industria alimentaría en la elaboración de productos como galletas, tortillas, dulces, lácteos, jugos y harina de nopal (Quishpi *et al*., 2024). Entre sus propiedades destaca su fracción mineral, caracterizada por su contribución en magnesio (Mg), potasio (K) y calcio (Ca) (Quintero *et al*., 2020). Sin embargo, de acuerdo con el estado de maduración del nopal, el calcio está disponible para la absorción humana se ve limitada por su interacción con el ácido oxálico ($C_2H_2O_4$) formando oxalatos de calcio (CaC_2O_4) que secuestran el mineral e impiden su asimilación metabólica. Estos compuestos se presentan en forma de cristales o drusas en algunos alimentos como hojas de taro, acelgas, espinacas y *Opuntias* (Salgado *et al*., 2023), concentrándose morfológicamente como whewellita (Oxalato de calcio monohidratado) o de Weddllita (Oxalato de calcio dihidratado) según autores Zuñiga *et al*., (2020). El objetivo de este avance semestral de investigación fue determinar la concentración de macrominerales, microminerales y oxalatos de calcio en harina de nopal del Cultivar Villanueva. Así como diseñar y estandarizar un prototipo gastrointestinal *in vitro* equipado con sensores de temperatura y pH, siguiendo la metodología internacional INFOGEST.

Materiales y Métodos

En este semestre se llevó a cabo de acuerdo con el plan de trabajo, la elaboración de harina de nopal, la determinación mineral de los cuales son macronutrientes y micronutrientes, la cuantificación de los oxalatos de calcio y el diseño del prototipo del modelo *in vitro* gastrointestinal.

Elaboración de Harina de nopal

La elaboración de la harina de nopal consistió en cortar los nopales en un peso de 100 g a 300 g en peso individual del mismo. Cada cladodio fue pesado en una báscula marca ETEKCITY modelo EK8060, después fue medido el largo y ancho con una cinta métrica y al final el grosor con un vernier eléctrico Figura 1.

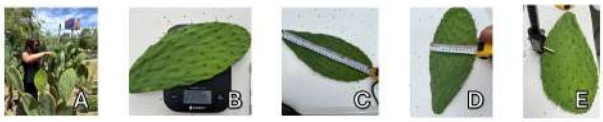


Figura 1. Cortar nopal (A), Pesar (B), Largo (C), Ancho (D) y Grosor (E).

Los cladodios fueron cortados en un grosor de 0.5 cm y colocados en charolas para llevar a secar a temperatura de 140 Fahrenheit (60°C) por 12 horas en un deshidratador de alimentos marca JOVATO Modelo H18-C001 Figura 2.

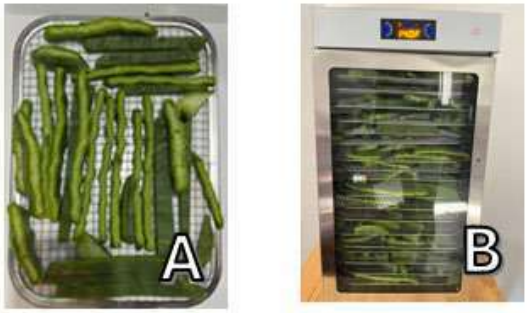


Figura 2. Nopal cortado en tiras (A), Deshidratador de alimentos (B).

Los cladodios secos se llevaron a moler en un molido eléctrico multifuncional de alta velocidad de trituración marca Grinder, modelo 700 como se ilustra en la Figura 3. La obtención de la molienda fue realizada hasta generar una finura de partícula entre 50 y 300 micras, la cual fue aprovechada para los posteriores análisis químicos.



Figura 3. Nopal seco (A), Harina de nopal (B).

Determinación de minerales

Las concentraciones de minerales serán evaluadas por Método de absorción atómica utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica marca GBS, modelo Savant AA, A7254, utilizando una llama de aire oxidante Figura 4 (Kumar *et al*., 2021).



Figura 4. Espectrofotómetro de absorción atómica.

Cuantificación de oxalatos de calcio

La determinación de oxalatos totales se evaluó por el método de titulación por ($KMnO_4$) Sarifudin *et al*., (2022), que consistió en tomar 5 g de muestra de harina de nopal, después se agregó 30 mL de H_2SO_4 0.5 N, seguido de calentamiento a 100 °C por 15 minutos, posteriormente la muestra fue filtrada y se lavó con 30 ml de agua destilada. Del filtrado se tomó 10 mL y se añadió 40 mL de H_2SO_4 0.5 N y se llevó la muestra a calentamiento por 5 minutos a 100 °C, después inmediatamente se llevó a titulación con permanganato de potasio ($KMnO_4$) hasta obtener un vire color rosa tenue. La fórmula para determinar el % de oxalatos totales fue la siguiente.

$$\boldsymbol{Calcium\ Oxalate\ content}\ \% = \frac{Molecular\ weight\ of\ Calcium\ oxalate\ X\ dilution\ factor}{Weight\ of\ sample\ g}$$

Prototipo de modelo *in vitro*

El modelo de digestión simulada a nivel laboratorio *in vitro* consistió en tres fases: fase oral, fase gástrica y fase intestinal,

siguiendo la metodología estandariza a nivel internacional de *INFOGEST* como se muestra en la Figura 5.

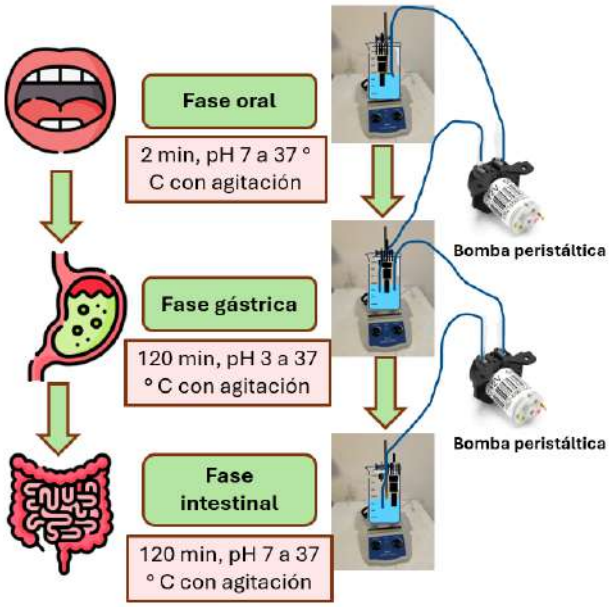


Figura 5. Prototipo de simulación gastrointestinal *in vitro.*

El prototipo de simulación gastrointestinal *in vitro* fue estandarizada la técnica con algunas modificaciones en el centro de Agricultura Protegida (CAP), el cual está compuesto por tres sensores DS18B20 Waterproof para medir la temperatura corporal humana requerida de 37° C en cada una de las fases, sensores de pH (electrodo) para medir en las diferentes fases solicitadas, dos Bombas peristálticas INTILLAB de 12V para llevar la digestión de una fase a otra de forma automática y un microcontrolador Arduino MEGA 2560.

Diseño experimental

Los datos obtenidos de esta investigación se evaluaron mediante estadística descriptiva.

Resultados y Discusión

Análisis de Minerales

Los resultados correspondientes a las concentraciones de macrominerales en la harina de nopal se reportaron en porcentaje (%) en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Macrominerales en la harina de nopal

Macromineral	Porcentaje %
Calcio (Ca)	2.74
Potasio (K)	4.17
Magnesio (Mg)	0.64
Fosforo (P)	0.23
Sodio (Na)	0.07

La composición macromineral del cultivar “Villanueva” presentó algunas similitudes al comparar con los datos que se reportaron por Zamora *et al*. (2025) con el cultivar “Milpa Alta” dicha investigación localizada en la Alcaldía de Milpa Alta, CDMX. Mientras que la concentración de calcio (Ca) fue similar 2.74 % y 2.42 % y el sodio (Na) se mostró ligeramente mayor en el cultivar “Villanueva” con 0.07 % y 0.03 %, las concentraciones de potasio (K) 4.17 %, magnesio (Mg) 0.64% y fosforo (P) 0.23 % fueron menores a las reportadas por Milpa Alta 5.57 %, 1.24 %, y 0.35 % respectivamente. Estas variaciones pueden explicarse por la diversidad genética entre cultivares y el contraste en las condiciones climáticas y edáficas.

Los resultados de los microminerales, fueron expresados en partes por millón (ppm), se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Microminerales en la harina de nopal

Macrominerales	ppm
Cobre (Cu)	5.38
Fierro (Fe)	69.37
Zinc (Zn)	29.40
Manganeso (Mn)	1559.52

El contenido de microminerales analizados en la harina de nopal presentó algunas variaciones al comparar con lo reportado por Valdez *et al*. (2026) quienes evaluaron atributos nutricionales en cladodios comerciales frescos de *Opuntia ficus indica* de la misma variedad Villanueva. Se observó una notable afinidad en los niveles de cobre (Cu), registrando 5.38 ppm y 4.71 ppm reportado por dichos autores. Por lo tanto, los contenidos de Fierro (Fe) 69.37 ppm y 10.49, el zinc (Zn) siendo mayor con 29.40 ppm y 10.49 ppm y manganeso (Mn) con 1559.52 y 22.1 fue superior en esta investigación, lo cual puede atribuirse al estado nutricional del suelo y manejo donde fue establecido el cultivo de nopal.

Cuantificación de oxalatos de calcio y prototipo gastrointestinal *in vitro*

El avance correspondiente a este semestre, la determinación de oxalatos totales por el método de titulación con permanganato de potasio ($KMnO_4$), así como el prototipo gastrointestinal *in vitro (*sensores de pH y temperatura*,* se encuentran actualmente en fase de acondicionamiento en espera de recepción de los reactivos y componentes electrónicos requeridos. Por lo tanto, en este escrito de avance semestral se incluye solo el perfil de macrominerales y microminerales en la harina de nopal del cultivar Villanueva.

Conclusiones

La harina de nopal del cultivar Villanueva destaca como una fuente importante de minerales, especialmente en potasio y calcio en su función como macrominerales. Al consultar la literatura con otras investigaciones, los resultados del perfil mineral dependen de la variedad, el manejo, donde las condiciones ambientales tienen un papel determinante en la absorción de estos elementos. La caracterización mineral obtenida en esta etapa constituye la base para la siguiente fase en la simulación gastrointestinal *in vitro*, para la biodisponibilidad de calcio y oxalatos presentes en la harina de nopal.

Agradecimientos

A mi director de Tesis el Ph. D. Rigoberto E. Vázquez Alvarado, mi Co-Director el Ph. D. Emilio Olivares Sáenz y a cada uno de mis asesores de tesis el Ph. D. Alejandro Isabel Luna Maldonado, el Dr. Carlos Alberto Garza Alonso la doctora Aurora Garza Júarez, a la Dra. Perla Giovanna Silva Flores, así como al Dr. Víctor Aguirre Arzola por su gran apoyo y experiencia al guiarme en esta investigación doctoral. A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo de la beca de manutención, misma que me ha permitido seguir con mi investigación.

Referencias Bibliográficas

Arredondo Valdez, J., García López, JI, Flores Breceda, H., Kumar, A., Valdez Cepeda, RD, & Luna Maldonado, AI (2026). Predicción

de atributos nutricionales y morfológicos de cladodios *de Opuntia* frescos comerciales mediante aprendizaje automático e imágenes. *Journal of Imaging* , *12* (2), 67. https://doi.org/10.3390/jimaging12020206

Kumar, S.; Louhaichi, M.; Dana Ram, P.; Tirumala, K.K.; Ahmad, S.; Rai, A.K.; Sarker, A.; Hassan, S.; Liguori, G.; Probir Kumar, G. Cactus Pear (*Opuntia ficus-indica*) Productivity, Proximal Composition and Soil Parameters as Affected by Planting Time and Agronomic Management in a Semi-Arid Region of India. Agronomy 2021, 11, 1647. https://doi.org/10.3390/agronomy11081647

Quintero-García M, Gutiérrez-Cortez E, Rojas-Molina A, Mendoza-Ávila M, Del Real A, Rubio E, Jiménez-Mendoza D, Rojas-Molina I. Calcium Bioavailability of *Opuntia ficus-indica* Cladodes in an Ovariectomized Rat Model of Postmenopausal Bone Loss. 2020 Nutrients. 15;12(5):1431. doi: 10.3390/nu12051431

Quishpi, J.M., Sanchez, T., Salgado, I., Castillo, B. y D. Campoverde. Potencialidades del Nopal en la industria alimentaria. Revista Un. Zulia. No. 3. Vol. 15. 435-465. DOI: https://doi.org/10.46925//rdluz.43.25

Reyes-Terrazas, Ana Surazi, Flores-Sánchez, Diego, Navarro-Garza, Hermilio, Pérez-Olvera, Ma. Antonia, & Almaguer-Vargas, Gustavo. (2023). Características y retos del sistema de cultivo nopal verdura en Cuautlacingo, Otumba. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *14*(2), 211-222. Epub 19 de junio de 2023.https://doi.org/10.29312/remexca.v14i2.3079

Salgado N, Silva MA, Figueira ME, Costa HS, Albuquerque TG. Oxalate in Foods: Extraction Conditions, Analytical Methods, Occurrence, and Health Implications. 2023. Foods. 3201. doi: 10.3390/foods12173201

Sarifudin, A., Ratnawati, L., Indrianti, N., Ekafitri, R., Sholichah, E., Afifah, N., Desnilasari, D., Nugroho, P. y A. D. Yuniar. 2022. Food Science and Technology. Campinas, 42, e09522. 1-7. D https://doi.org/10.1590/fst.09522

Zamora-Morales, Bertha Patricia, Báez-Pérez, Aurelio, Bonilla-Valencia, Leticia, Zegbe-Domínguez, Jorge Artemio, Zamora-Martínez, Marisela Cristina, & Quevedo-Nolasco, Abel. (2025). Efecto de las propiedades físicas y químicas del suelo en el estado nutrimental del nopal-verdura (Opuntia ficus-indica (L.) Mill.) variedad Milpa Alta. *Polibotánica*, (60), 307-324.https://doi.org/10.18387/polibotanica.60.18

Zayed, A., Adly, GM y Farag, MA. Estrategias de gestión del antinutriente ácido oxálico en los alimentos: una visión general exhaustiva de sus fuentes dietéticas, funciones, metabolismo y procesamiento. *Food Bioprocess Technol* 18, 4280–4300.

https://doi.org/10.1007/s11947-024-03726-0

Zúñiga Valenzuela, Rafael, Gutiérrez Castorena, Edgar Vladimir, Gutiérrez Castorena, María Del Carmen, Olivares Sáenz, Emilio, Méndez Gallegos, Santiago de Jesús, Carranza de la Rosa, Roberto, & Vázquez Alvarado, Rigoberto Eustacio. (2020). Caracterización de CaCO3 y CaC2O4 con análisis microfotográfico en Opuntia ficus-indica (L.) Miller. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *9* (7), 1524-1531.https://doi.org/10.29312/remexca.v9i7.472

Análisis de niveles tecnológicos para fortalecer la resiliencia de los sistemas citrícolas de Nuevo León

Nestor Magdaleno Montoya-Pineda[1*]; Alejandro Isabel Luna-Maldonado[1]; Mario Alberto Méndez-Dorado[2]; Osorio Hernández-Eduardo[3]; Héctor Flores-Breceda[1]; Celestino García-Gómez[1]
[1] Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Av. Francisco I. Madero S/N, Col. Ex Hacienda el Cañada, CP. 66050 Cdad. Gral. Escobedo, Nuevo León, México.
[2] Departamento de maquinaria agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, C.P. 25315. Saltillo, Coahuila, México.
[3] Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario, C.P. 87149. Cdad. Victoria, Tamaulipas.
*Email: nestor.montoyap@uanl.edu.mx

Resumen. La citricultura de Nuevo León enfrenta sequías, estrés hídrico, presión fitosanitaria y degradación de los recursos naturales, y se desconoce si las huertas con mayor adopción de tecnologías de agricultura de precisión presentan mayor resiliencia. El objetivo es comparar la resiliencia agroecosistémica entre cuatro niveles de adopción tecnológica en huertas citrícolas comerciales de seis municipios del estado. Se propone un estudio observacional, transversal y correlacional-comparativo en 10 huertas seleccionadas mediante muestreo estratificado por nivel tecnológico durante el ciclo 2026-2027. Cada huerta se clasificará mediante un índice de adopción tecnológica basado en ocho indicadores (puntaje de 0 a 16) y se evaluará con un índice de resiliencia agroecosistémica, adaptado del AgRI, calculado con y sin la dimensión tecnológica, a fin de evitar la circularidad. Se contrastará la hipótesis de que la resiliencia aumenta con el nivel tecnológico mediante ANOVA o la prueba de Kruskal-Wallis, pruebas de tendencia, regresión con covariables (tamaño, edad de la plantación, portainjerto y fuente de agua), análisis de componentes principales y de conglomerados, y análisis de sensibilidad de los pesos del índice. Se espera caracterizar la asociación entre la adopción tecnológica y la resiliencia, identificar los componentes que más la explican y generar una base georreferenciada como insumo para una plataforma de apoyo a la toma de decisiones. Los resultados describirán asociaciones, no efectos causales.
Palabras clave. Citricultura, gestión del riesgo agrícola, agricultura de precisión, agricultura resiliente, tecnologías agrícolas.

Abstract. Citrus production in Nuevo León faces drought, water stress, pest and disease pressure, and natural resource degradation. It is unknown whether orchards that adopt precision agriculture technologies more widely are more resilient. This study aims to compare agroecosystem resilience across four technology-adoption levels in commercial citrus orchards in six municipalities in the state. We propose an observational, cross-sectional, correlational-comparative study of 10 orchards selected through stratified sampling by technology level during the 2026–2027 growing season. Each orchard will be classified using a technology adoption index based on eight indicators (score range: 0–16) and assessed using an agroecosystem resilience index adapted from AgRI, calculated both with and without the technology dimension to avoid circularity. The hypothesis that resilience increases with technology level will be tested using ANOVA or the Kruskal–Wallis test, trend tests, regression with covariates (orchard size, planting age, rootstock, and water source), principal component and cluster analyses, and sensitivity analysis of the index weights. The

study is expected to characterize the association between technology adoption and resilience, identify the components that best explain it, and generate a georeferenced database to support the development of a decision-support platform. The results will describe associations, not causal effects.
Keywords: Citriculture; Agricultural risk management; Precision agriculture; Resilient agriculture; Agricultural technologies.

Introducción

La citricultura es una de las actividades agrícolas más relevantes de Nuevo León y se concentra en Montemorelos, General Terán, Linares, Allende, Hualahuises y Cadereyta Jiménez. En 2024 el estado registró 25,667 ha sembradas y una producción de 181,858 t, con la naranja como cultivo predominante (SIAP, 2024). Esta actividad se sustenta en condiciones climáticas favorables, suelos fértiles y una tradición productiva de varias décadas.

El sector enfrenta presiones crecientes. El cambio climático intensifica las sequías y el estrés hídrico, con efectos en la productividad y la estabilidad económica de los productores (FAO, 2025). Las proyecciones disponibles anticipan aumentos de la temperatura y reducciones en los recursos de agua dulce y en el rendimiento agrícola (Misra, 2014) . El clima también modifica el riesgo fitosanitario, como lo evidencia la zonificación futura de una enfermedad de los cítricos en Brasil (Torsoni *et al*., 2025). Entre las amenazas biológicas destaca el Huanglongbing (HLB), que compromete la calidad y la comercialización de la fruta (Thakuria *et al*., 2023). Además, la respuesta de los cultivares depende de sus requerimientos térmicos (Abdel-Sattar *et al*., 2024), por lo que la variabilidad climática afecta de manera desigual a cada variedad.

Frente a este panorama, las huertas difieren ampliamente en el uso de riego tecnificado, sensores, imágenes satelitales o de vehículos aéreos no tripulados (UAV), registros digitales y prácticas regenerativas. Se asume que esta tecnología aumenta la capacidad de las huertas para absorber perturbaciones, adaptarse y recuperarse, pero esa relación rara vez se ha medido mediante un índice integral y comparable entre los diferentes niveles tecnológicos en la citricultura del noreste de México. Esta falta de evidencia limita el diseño de estrategias de adopción gradual y de políticas de apoyo.

En este trabajo, la resiliencia agroecosistémica se entiende como la capacidad de la huerta para mantener su función productiva y sus procesos ecológicos ante perturbaciones y adaptarse a ellas (Cabel & Oelofse, 2012; Holling, 2013). La *vulnerabilidad* se entiende como función de la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa.

El objetivo de este trabajo es comparar la resiliencia agroecosistémica de huertas citrícolas de Nuevo León clasificadas en cuatro niveles de adopción tecnológica. A demás de : (1) Construir y validar con expertos un índice de adopción tecnológica que clasifique las huertas en cuatro niveles; (2) estimar el índice de resiliencia agroecosistémica (AgRI adaptado) de cada

huerta, con y sin la dimensión tecnológica; (3) contrastar las diferencias de resiliencia entre niveles, controlando por tamaño, edad de plantación, portainjerto, fuente de agua y municipio; (4) identificar los componentes del índice y las variables de manejo que más explican esas diferencias; y (5) generar una base georreferenciada y mapas de vulnerabilidad y resiliencia como insumo de una plataforma de apoyo a decisiones.

Materiales y Métodos

Estudio observacional, transversal y correlacional-comparativo. No se asignan tratamientos ni se manipulan variables: las huertas se comparan según el nivel tecnológico que ya tienen. Los datos de rendimiento y siniestros abarcan un periodo retrospectivo de 10 ciclos, y las mediciones de campo se realizan en el ciclo 2026-2027. Las inferencias serán asociativas, no causales. A partir de los resultados se formularán recomendaciones, pero la difusión y la adopción gradual de tecnologías (extensión) quedan como una fase posterior, fuera del alcance de este estudio.

Área de estudio

La investigación se realizará en la región citrícola de Nuevo León, integrada por los municipios de General Terán, Montemorelos, Linares, Allende, Hualahuises y Cadereyta Jiménez, donde se concentra la mayor superficie y producción de cítricos del estado (SIAP, 2025) . Se incluirán un mapa de localización y la caracterización del clima, de los suelos y de las fuentes de agua por municipio. Esta región presenta una alta exposición a sequías, temperaturas elevadas y eventos hidrometeorológicos intensos. La temperatura media anual es de alrededor de 20°C; la temperatura máxima promedio es de 34°C y se presenta de mayo a agosto; la temperatura mínima promedio es de 5°C y se presenta en enero; la precipitación media estatal es de 654 mm anuales; las principales lluvias se presentan en verano, en los meses de agosto y septiembre (AGRONL, 2025) .

Población, muestra y unidades de análisis

- Unidad de análisis: huerta citrícola comercial. Unidad de observación: lote o zona de manejo dentro de la huerta, utilizada únicamente para el análisis espacial.
- Población: huertas comerciales de cítricos de los seis municipios, registradas en el Fondo de Aseguramiento Agrícola de Citricultores de Nuevo León.
- Criterios de inclusión: superficie mínima de 5 ha; plantación en producción con una edad mínima de 10 años; consentimiento del productor; registros de al menos 5 ciclos.
- Criterios de exclusión: cambio de manejo o de propietario en los últimos 5 años; daño total por un evento extremo durante el ciclo de estudio.
- Muestreo: estratificado por nivel tecnológico (preclasificación mediante un cuestionario breve) y proporcional por municipio dentro de cada estrato.
- Tamaño de muestra: para un ANOVA de cuatro grupos, con un efecto medio ($f = 0.25$) y $\alpha = 0.05$, será de

10 huertas. Si el estrato NT4 es escaso, se reportará el desequilibrio y se utilizarán pruebas no paramétricas. Para el análisis de componentes principales, se requiere un mínimo de 10 huertas por cada variable incluida.

Cada huerta se evaluará con información productiva, ambiental, tecnológica, económica y social obtenida mediante trabajo de campo, entrevistas semiestructuradas, registros productivos, observación directa y herramientas geoespaciales.

Clasificación de los niveles tecnológicos

Las unidades se clasificarán en cuatro niveles de adopción tecnológica mediante un índice construido únicamente a partir de tecnologías de manejo agronómico, de monitoreo, de digitalización y de agricultura de precisión. Las prácticas regenerativas, las coberturas vegetales y la gestión del riesgo se retiraron del índice y se evalúan dentro del AgRI, para que el nivel tecnológico no se calcule con las mismas variables que el resultado. Cada indicador se puntúa con 0 (ausente), 1 (parcial u ocasional) o 2 (sistemático e integrado en la toma de decisiones).

Cuadro 1. Indicadores para asignar los niveles.

Indicador	NT1 0	NT2 1	NT3 2	NT4 3
Análisis de suelo	No	O	Sí	Sí
Riego tecnificado	No	Sí	Sí	Sí
Sensores y monitoreo digital	No	No	Sí	Sí
UAV o imágenes satelitales	No	No	Sí	Sí
Agricultura regenerativa	No	P	P	Sí
Gestión del riesgo climático	No	B	M	I
Registros digitales	No	B	Sí	Sí
Trazabilidad productiva	No	No	Sí	Sí

Nota: O: Ocasional; P: Parcial; M: Moderado; I: Integral

Nivel Tecnológico 1 (NT1): Manejo convencional

Corresponde a unidades productivas que operan bajo esquemas tradicionales de manejo, donde las decisiones agronómicas se sustentan principalmente en la experiencia del productor y en observaciones de campo, con una incorporación limitada de tecnologías de monitoreo o de análisis de datos.

Nivel Tecnológico 2 (NT2): Sistema Tecnificado Básico

Incorporación de prácticas de monitoreo agronómico, registros productivos, análisis de suelo y de agua, riego tecnificado y toma de decisiones basada en información técnica.

Nivel Tecnológico 3 (NT3): Sistema de Agricultura de Precisión

Uso de sensores, imágenes satelitales o UAV, monitoreo georreferenciado, aplicaciones variables de insumos, plataformas digitales y apoyo con herramientas de análisis de datos.

Nivel Tecnológico 4 (NT4): Agricultura inteligente o digital

Integración de la agricultura de precisión, de prácticas regenerativas o sostenibles, de la conservación de los recursos, de la biodiversidad funcional y de estrategias formales de gestión del riesgo climático y productivo.

Cuadro 2. Niveles tecnológicos, rangos provisionales de puntaje y condiciones mínimas.

Nivel	Puntaje	Condición mínima	Desc.
NT1. Manejo convencional	0-3	Ninguna	Decisiones basadas en la experiencia del productor y la observación de campo; monitoreo y análisis de datos limitados.
NT2. Tecnificado básico	4-7	Ninguna	Monitoreo agronómico básico, registros, análisis de suelo y agua, riego tecnificado y decisiones con información técnica.
NT3. Agricultura de precisión	8-11	Puntaje ≥ 1 en sensores y en UAV o imágenes satelitales	Sensores, imágenes, monitoreo georreferenciado, aplicación variable y plataformas digitales.
NT4. Digital integrado	12-16	Puntaje 2 en registros digitales y en sensores	Integración de la agricultura de precisión con el análisis de datos para la toma de decisiones.

Los umbrales son provisionales: se calibrarán mediante un panel de expertos (método Delphi) y una prueba piloto en 10 huertas, y se reportarán la concordancia entre evaluadores (kappa ponderado) y la consistencia interna del índice (alfa de Cronbach).

La asignación de cada unidad a un nivel tecnológico se realizará con base en una matriz de indicadores y un sistema de puntuación previamente establecidos, a fin de minimizar la subjetividad del proceso de clasificación.

Etapa 1. Medición y caracterización integral

Se realizará el diagnóstico de cada huerta mediante información física, biológica, productiva, económica, tecnológica y ambiental. Variables independientes y dependientes: nivel tecnológico (ordinal, NT1-NT4, y puntaje del índice) y AgRI adaptado (0-1). Covariables: tamaño de huerta, edad de plantación, variedad, portainjerto, densidad de árboles, fuente de agua, municipio, tenencia, y edad y escolaridad del productor.

- Textura, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, densidad aparente y capacidad de retención de humedad.
- Macronutrientes y micronutrientes.
- Muestreo compuesto a 30-60 cm, con análisis conforme a la NOM-021-SEMARNAT-2000.

Variables hídricas

- Fuente de abastecimiento, calidad del agua de riego y consumo de agua.
- Frecuencia de riego, eficiencia del sistema y humedad del suelo.

Variables climáticas

- Temperatura, humedad relativa, precipitación y evapotranspiración.
- Viento, heladas, granizo y olas de calor, a partir de estaciones cercanas y de bases de datos regionales.

Variables del cultivo y fitosanitarias

- Especie, variedad, portainjerto, edad de la plantación, densidad, estado fenológico e índices de vegetación (NDVI y otros), con fechas de imagen definidas.

- Rendimiento histórico.
- Incidencia y severidad de plagas y enfermedades, y frecuencia de las aplicaciones fitosanitarias.

Variables productivas, económicas y tecnológicas

- Producción por hectárea, calidad de la fruta, costos de producción, consumo energético, ingresos brutos, margen neto e inversión en tecnología.
- Tipo de tecnologías utilizadas, nivel de automatización, uso de sensores, plataformas digitales, imágenes satelitales y drones, monitoreo del riego, gestión fitosanitaria y capacitación tecnológica del productor.

Fuentes de información

Muestreos de suelo y agua, análisis de laboratorio, sensores de humedad del suelo, estaciones meteorológicas, imágenes satelitales, UAV, registros productivos y económicos, encuestas y entrevistas a productores (con guía validada por expertos, prueba piloto y consentimiento informado) y observaciones de campo. Con esta información se integrará un expediente digital por huerta (datos geográficos, historial productivo, información edáfica e hídrica, tecnológica y fitosanitaria, eventos climáticos extremos y siniestros).

Etapa 2. Análisis de vulnerabilidad y resiliencia

Análisis espacial. Con herramientas geoespaciales se delimitarán zonas de manejo y se identificarán áreas con estrés hídrico, restricciones nutricionales, alta incidencia de plagas y enfermedades, y bajo rendimiento.

Vulnerabilidad. Se estimará como función de tres componentes: exposición (condiciones climáticas y eventos extremos), sensibilidad (calidad del suelo, disponibilidad de agua, presión fitosanitaria, variabilidad del rendimiento y dependencia de insumos externos) y capacidad adaptativa (rentabilidad, capacidad de inversión, acceso a capacitación y disponibilidad de herramientas de monitoreo). Cada indicador se normalizará a la escala 0-1 y se agregará por componente.

Índice de Resiliencia Agroecosistémica (AgRI adaptado). Se parte del AgRI de Cleves-Leguízamo *et al*., 2020) , un método multicriterio basado en la agrobiodiversidad. Como el índice original no fue diseñado para evaluar perturbaciones climáticas y económicas en la citricultura, se adaptará: cada dimensión e indicador se justificará con la literatura y se validará con expertos, y se denominará AgRI adaptado. Las seis dimensiones se presentan en el Cuadro 3. Los indicadores se normalizarán a 0-1 (mínimo-máximo), se ponderarán con y se agregarán por dimensión y en total. El resultado principal será el AgRI sin la dimensión tecnológica; el AgRI completo se reportará como análisis secundario. Se realizará un análisis de sensibilidad con pesos iguales y alternos (simulación de Monte Carlo) para evaluar la estabilidad del orden de las huertas.

Cuadro 3. Dimensiones y componentes evaluados del Índice de Resiliencia Agroecosistémica (AgRI).

Dimensión	Componentes evaluados
Ecofisiológica	Calidad del suelo, disponibilidad hídrica, clima, pendiente y cobertura vegetal

Dimensión	Componentes evaluados
Biótica	Biodiversidad funcional, sanidad vegetal, diversidad de cultivos y conectividad ecológica
Sociocultural	Capacitación, experiencia, organización, acceso a asistencia técnica
Económica	Rentabilidad, diversificación de ingresos, capacidad de inversión y acceso a financiamiento
Tecnológica	Agricultura de precisión, monitoreo digital, automatización, uso de sensores y gestión de información
Gestión del riesgo	Sequía, plagas, eventos climáticos extremos, estrategias de prevención y capacidad adaptativa

Etapa 3. Fortalecimiento tecnológico y gestión del riesgo

Se realizará estadística descriptiva y exploratoria, y se verificarán la normalidad y la homogeneidad de varianzas. La comparación del AgRI entre niveles se realizará mediante ANOVA o Kruskal-Wallis, según los supuestos, con comparaciones múltiples y análisis del tamaño del efecto; como los niveles son ordinales, se aplicará además la prueba de tendencia de Jonckheere-Terpstra. El efecto del nivel tecnológico se estimará mediante regresión múltiple con covariables y, si las huertas se agrupan por municipio, mediante un modelo mixto con el municipio como efecto aleatorio, verificando la multicolinealidad. Se aplicarán análisis de componentes principales (previa verificación del KMO y de la prueba de Bartlett) y de conglomerados para identificar patrones y tipologías de productores, así como análisis de correlación para explorar las relaciones entre variables. En el análisis geoespacial se evaluará la autocorrelación espacial mediante el índice I de Moran. Se usarán R y QGIS, con $\alpha = 0.05$, corrección por comparaciones múltiples e intervalos de confianza. Los datos faltantes se tratarán mediante imputación múltiple si superan el 5 %. Si se construyen modelos predictivos de estrés hídrico, se validarán mediante una partición de entrenamiento y prueba y se reportarán el RMSE y el R^2; no formarán parte de la inferencia principal.

Los datos se manejarán con consentimiento informado por escrito, anonimización de los productores y resguardo de las coordenadas de las huertas, conforme a la normativa mexicana de protección de datos personales.

Etapa 4. Evaluación de resultados

La evaluación se realizará de forma continua durante todo el periodo de estudio.

Indicadores productivos

- Rendimiento (t ha^{-1}).
- Calidad de fruta.
- Eficiencia en el uso del agua.
- Productividad por unidad de superficie.

Indicadores económicos

- Costos de producción.
- Margen neto.
- Relación beneficio-costo.
- Retorno de inversión tecnológica.

Indicadores ambientales

- Materia orgánica del suelo.
- Eficiencia en el uso de recursos.
- Consumo de agua.
- Consumo energético.
- Conservación del suelo.

Indicadores tecnológicos

- Nivel de adopción tecnológica.
- Intensidad de uso de herramientas digitales.

- Cobertura de monitoreo.
- Integración de la información para la toma de decisiones.

Indicadores de riesgo y resiliencia

- Frecuencia e impacto de los eventos adversos.
- Capacidad de recuperación del sistema productivo.
- Índice de Resiliencia Agroecosistémica (AgRI)
- Nivel de vulnerabilidad de cada unidad productiva.

Análisis de datos

La información obtenida se analizará mediante herramientas estadísticas, geoespaciales y de minería de datos para identificar patrones y relaciones entre los niveles tecnológicos y el desempeño de las huertas.

Se emplearán:

- Estadística descriptiva.
- Análisis exploratorio de datos.
- Análisis de correlación.
- Modelos de regresión.
- Análisis de componentes principales (ACP).
- Análisis de conglomerados (clúster).
- Análisis multivariado.
- Sistemas de Información Geográfica (SIG).
- Modelos predictivos de estrés hídrico y de vulnerabilidad.

Los resultados permitirán identificar los componentes tecnológicos y de manejo que más contribuyen a la productividad, la sostenibilidad, la resiliencia y la rentabilidad de los sistemas citrícolas.

Productos esperados

- Plataforma digital para el análisis de la Región Citrícola de Nuevo León.
- Expediente Digital de la Huerta.
- Sistema de monitoreo suelo-planta-atmósfera.
- Mapas de vulnerabilidad y resiliencia.
- Índice de Resiliencia Agroecosistémica (AgRI).
- Recomendaciones para la adopción gradual de tecnologías.
- Tesis doctoral y publicaciones científicas.
- Metodología de escalamiento para 50, aplicable a 5,000 hectáreas.

Resultados y Discusión

Esta propuesta aún no cuenta con datos. Se espera obtener la distribución de las huertas en los cuatro niveles tecnológicos, los valores del AgRI adaptado (global y por dimensión) y la dirección y magnitud de su asociación con el nivel tecnológico, así como los componentes y variables de manejo que mejor expliquen las diferencias. Las limitaciones previstas son: el diseño transversal no permite afirmar causalidad, y puede haber causalidad inversa (las huertas más resilientes invierten más en tecnología); existe sesgo de selección, porque los productores que aceptan participar pueden ser más abiertos a la tecnología; los datos de autorreporte y retrospectivos están sujetos a sesgo de memoria; el AgRI adaptado depende de las ponderaciones elegidas, por lo que se realiza análisis de sensibilidad; y el estudio se limita a una región y a un periodo corto.

Conclusiones

Este protocolo establece una ruta metodológica coherente para medir si la adopción de la agricultura de precisión se asocia con una mayor resiliencia en la citricultura de Nuevo León: un índice tecnológico validado, un índice de resiliencia sin variables compartidas con el predictor y contrastado con el rendimiento real, y un prototipo de plataforma que integra ambos para apoyar la toma de decisiones. Por el tamaño de la muestra, el estudio estimará la dirección, la magnitud y la incertidumbre de la asociación, sin afirmar causalidad. Su aporte principal será un instrumento de medición validado y los parámetros necesarios para dimensionar una fase confirmatoria con un mayor número de huertas.

Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la concesión de la Beca Nacional de Posgrado 2025-2, identificada con el número de solicitud 68af4f151aa8436247dc0c54. Asimismo, se agradece a la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), al Departamento de Maquinaria Agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) y a la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Autónoma de Tamaulipas (UAT), por facilitar el acceso a infraestructura tecnológica, equipamiento especializado y apoyo técnico, recursos indispensables para el desarrollo adecuado de las actividades del proyecto y el logro de sus objetivos.

Referencias Bibliográficas

Abdel-Sattar, M., Al-Obeed, R. S., & Aboukarima, A. M. (2024). Yield and Heat Unit Requirements for Several Citrus Cultivars over Several Seasons in Egypt. *Horticulturae*, *10*(7). https://doi.org/10.3390/horticulturae10070712

AGRONL. (2025). *Climatología – Campo NL*.

Cabel, J. F., & Oelofse, M. (2012). An indicator framework for assessing agroecosystem resilience. In *Ecology and Society* (Vol. 17, Number 1). https://doi.org/10.5751/ES-04666-170118

Cleves-Leguízamo, J.-A., Youkhana, E., & Toro-Calderon, J. (2020). Agroecosystemic Resilience Index (AgRI): a method to assess agrobiodiversity. *bioRxiv*.

FAO. (2025). *Climate Change*. Https://Www.Fao.Org/Climate-Change/En/.

Holling, C. S. (2013). Resilience and stability of ecological systems. In *The Future of Nature: Documents of Global Change*. https://doi.org/10.2307/jj.41003648.6

Misra, A. K. (2014). Climate change and challenges of water and food security. In *International Journal of Sustainable Built Environment* (Vol. 3, Number 1). https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.04.006

SIAP. (2024, August 15). *Hoja 1 de 2*. https://www.gob.mx/cms/uploads/at

tachment/file/938469/Naranja_Julio.pdf

SIAP. (2025). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*.

Thakuria, D., Chaliha, C., Dutta, P., Sinha, S., Uzir, P., Singh, S. B., Hazarika, S., Sahoo, L., Kharbikar, L. L., & Singh, D. (2023). Citrus Huanglongbing (HLB): Diagnostic and management options. In *Physiological and Molecular Plant Pathology* (Vol. 125). https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2023.102016

Torsoni, G. B., Aparecido, L. E. de O., Baratti, A. C. C., Rossi, M. F. de M., Lorençone, P. A., & Lorençone, J. A. (2025). Climatic zoning and future projections of citrus black spot in Brazil: adaptive strategies for sustainable citrus farming in the face of climate change. *Journal of Plant Pathology*, *107*(4). https://doi.org/10.1007/s42161-025-01976-1

Evaluación del efecto de la escala de entrenamiento espacial en la detección de árboles basada en UAV mediante aprendizaje profundo

Gilbert Fresh López-López[1*]; Alejandro Isabel Luna-Maldonado[1]; Tsuyoshi Kajisa[4]; Héctor Flores-Breceda[1]; Julia Mariana Márquez-Reyes[1]; Moisés Hinojosa-Rivera[2]; Hugo Gutiérrez-Flores[3].
[1] Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399.
[2] Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, A.P. 076 Suc. F., Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66450 México.
[3] Departamento de Maquinaria Agrícola, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calz. Antonio Narro, 1923, Buenavista 25315, Saltillo Coahuila, México.
[4] Faculty of Agriculture, Kagoshima University, Kagoshima 890-8580, Japan
*Email: gilbert.lopezlopez@unam.edu.mx

Resumen. La detección automática de árboles mediante imágenes de UAV y algoritmos de aprendizaje profundo depende en gran medida de la calidad de los datos de entrenamiento. Sin embargo, se ha explorado poco el efecto de la escala espacial utilizada para generar conjuntos de datos a partir de ortomosaicos. Este estudio evaluó cómo la resolución influye en el desempeño de YOLOv11 para detectar árboles individuales, utilizando imágenes capturadas con un DJI Phantom 4 Multiespectral en los bosques de la Universidad de Kagoshima (Japón). El ortomosaico RGB se procesó con Pix4Dmapper y luego se dividió con Python en imágenes de 512 × 512, 1024 × 1024 y 2048 × 2048 píxeles. Los conjuntos de datos de 512 × 512 y 2048 × 2048 píxeles se etiquetaron manualmente en Roboflow y se utilizaron para entrenar modelos YOLOv11 en Google Colab. La resolución de 2048 × 2048 píxeles obtuvo un mAP@0.50 de 0.794 y un F1-score de 0.72, por encima de los valores de 0.676 y 0.70, respectivamente, alcanzados con la resolución de 512 × 512 píxeles. Aunque solo se utilizaron 243 imágenes de entrenamiento, frente a las 3380 generadas para la resolución de 512 × 512 píxeles, las imágenes de mayor tamaño ofrecieron un mejor desempeño de detección. Estos hallazgos sugieren que preservar el contexto espacial influye más que la cantidad de imágenes disponibles para el entrenamiento y destacan la resolución como una variable clave para optimizar conjuntos de datos de UAV destinados a aplicaciones forestales basadas en inteligencia artificial.
Palabras clave. Aprendizaje profundo; resolución de imágenes; visión por computadora; monitoreo forestal.

Abstract. Automatic tree detection using UAV imagery and deep learning algorithms depends largely on the quality of the training data. However, the effect of the spatial scale used to create datasets from orthomosaics has been scarcely investigated. This study evaluated the influence of tile size on the performance of YOLOv11 for individual tree detection using imagery acquired with a DJI Phantom 4 Multispectral at the Kagoshima University Forests, Japan. The RGB orthomosaic was processed using Pix4Dmapper and subsequently divided with Python into image tiles of 512 × 512, 1024 × 1024, and 2048 × 2048 pixels. The 512 × 512 and 2048 × 2048 pixel datasets were manually annotated in Roboflow and used to train YOLOv11 models in Google Colab. The 2048 × 2048 pixel tile size achieved an mAP@0.50 of 0.794 and an F1-score of 0.72, outperforming the 512 × 512

pixel tile size, which obtained values of 0.676 and 0.70, respectively. Although only 243 training images were used for the 2048 × 2048 pixel dataset, compared to 3380 images generated for the 512 × 512 pixel dataset, the larger images provided superior detection performance. These findings suggest that preserving spatial context has a greater influence on model performance than the number of training images available and highlight tile size as a key variable for optimizing UAV-derived datasets for forest monitoring applications based on artificial intelligence.
Keywords: Deep learning; image resolution; computer vision; forest monitoring.

Introducción

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) han transformado el monitoreo forestal al proporcionar imágenes de alta resolución espacial que permiten evaluar con detalle la cobertura arbórea, la estructura del dosel y la distribución de los cultivos (árboles individuales). La combinación de UAV con técnicas de visión por computadora y de aprendizaje profundo ha impulsado el desarrollo de metodologías automatizadas para la detección y el inventario forestal, reduciendo significativamente el tiempo y los costos asociados a los procedimientos de campo convencionales (Luo *et al*., 2024; Lv *et al*., 2023; Dubrovin *et al*., 2024).

Entre las técnicas de aprendizaje profundo, los modelos de detección de objetos de la familia You Only Look Once (YOLO por sus siglas en inglés) han demostrado un desempeño destacado debido a su capacidad para identificar objetos con alta precisión y rapidez de procesamiento. Como resultado, numerosas investigaciones han empleado diferentes versiones de YOLO para detectar árboles individuales en imágenes obtenidas mediante sensores remotos, logrando resultados prometedores en aplicaciones de inventario forestal, monitoreo de ecosistemas y gestión de recursos naturales (Wang *et al*., 2025; Liu *et al*., 2024; Hofinger *et al*., 2023).

Sin embargo, la mayoría de los estudios se han centrado en la comparación de arquitecturas de detección, ajustes de aprendizaje automático o estrategias de aumento de datos, mientras que los aspectos fundamentales relacionados con la construcción de los conjuntos de datos de entrenamiento han recibido menos atención. En particular, la preparación de datos a partir de ortomosaicos generados mediante UAV suele requerir la segmentación de las imágenes a diferentes resoluciones para facilitar los procesos de anotación y de entrenamiento. Esta decisión metodológica influye directamente en la cantidad de muestras disponibles, el nivel de detalle observado y el contexto espacial proporcionado al modelo (Wang *et al*., 2025; Liu *et al*., 2024; Lv *et al*., 2023).
La elección de la resolución representa un compromiso entre dos factores potencialmente contrapuestos. Por un lado, las resoluciones pequeñas generan más imágenes de entrenamiento, lo que incrementa la cantidad de muestras disponibles para el aprendizaje del modelo. Por otra parte, las resoluciones más grandes incorporan una mayor proporción del contexto espacial circundante, incluyendo relaciones entre copas, patrones de distribución forestal y características del dosel que podrían favorecer la identificación de árboles individuales. A pesar de la

relevancia de este compromiso, aún existe una comprensión limitada de cómo la escala espacial utilizada en la construcción de conjuntos de datos influye en el desempeño de los modelos de detección forestal basados en aprendizaje profundo (Hao *et al*., 2023; Dubrovin *et al*., 2024).

Esta brecha de conocimiento resulta particularmente importante porque las decisiones relacionadas con la segmentación de ortomosaicos suelen adoptarse de forma empírica y dependen de la experiencia del investigador, sin contar con criterios metodológicos suficientemente respaldados por evidencia experimental. En consecuencia, permanece sin resolverse si el uso de un gran número de resoluciones pequeñas ofrece mayores beneficios que el uso de un número reducido de resoluciones de gran tamaño para la detección automática de árboles individuales (Lv *et al*., 2023; Hao *et al*., 2023).

Por lo tanto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la influencia del tamaño de resolución empleado en la construcción de conjuntos de datos derivados de ortomosaicos de UAV sobre el desempeño de los modelos YOLOv11 para la detección automática de árboles individuales. Para ello, se generaron conjuntos de datos (datasets) a partir de un ortomosaico forestal obtenido en la Kagoshima University Forests (Tarumizu, Kagoshima, Japón) a diferentes resoluciones de 512 × 512 y 2048 × 2048 píxeles, y se analizó su efecto sobre métricas de desempeño como precisión, sensibilidad y precisión media (mAP). Los resultados de esta investigación contribuirán al establecimiento de criterios metodológicos para optimizar la preparación de conjuntos de datos destinados a aplicaciones de monitoreo forestal basadas en inteligencia artificial y al uso de estos en la agricultura.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en la Universidad Forestal de Kagoshima, ubicada en Tarumizu, prefectura de Kagoshima, Japón. El área de estudio corresponde a un ecosistema forestal destinado a la investigación y al monitoreo de los recursos forestales. La cobertura arbórea presenta una distribución heterogénea de las copas, lo que constituye un escenario adecuado para evaluar algoritmos de detección automática de árboles individuales. A continuación, se describe el proceso llevado a cabo para alcanzar el objetivo, como se muestra en la Figura 1.

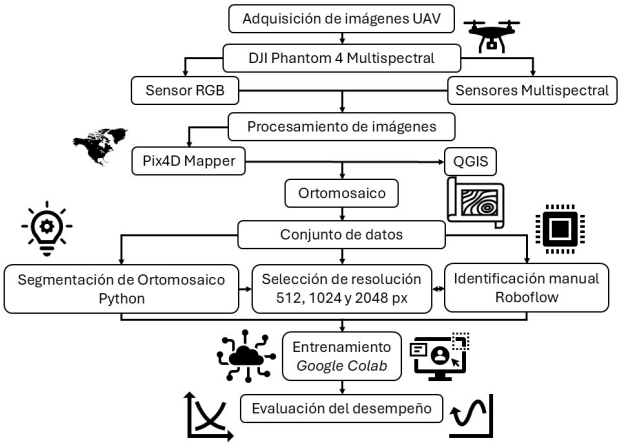


Figura 1. Diagrama de actividades

Adquisición de imágenes UAV

La adquisición de datos se realizó con un DJI Phantom 4 Multispectral, equipado con una cámara RGB y sensores multiespectrales.

Los vuelos se llevaron a cabo conforme a una planificación previamente establecida, con el fin de garantizar una cobertura completa del área de estudio y un traslape adecuado entre imágenes consecutivas. Las imágenes obtenidas se emplearon para generar un ortomosaico georreferenciado de alta resolución. Parámetros del vuelo: altura, 70 m; traslape frontal, 80 %; traslape lateral, 80 %; GSD, 3.7 cm píxel^{-1}; fecha del vuelo, 9 de julio de 2026; superficie cubierta, 85,872 m².

Procesamiento de imágenes

Las imágenes capturadas con el UAV se procesaron en Pix4Dmapper. El flujo de trabajo incluyó la alineación automática de las imágenes, la generación de una nube de puntos, la creación del modelo digital de superficie, la ortorrectificación y la elaboración del ortomosaico RGB.

El ortomosaico resultante constituyó la base para la creación de los conjuntos de datos utilizados en la detección automática de árboles.

Conjunto de datos

Para evaluar el efecto de la resolución en el desempeño del modelo de detección, se desarrolló un script en Python para segmentar automáticamente el ortomosaico original en imágenes de dimensiones predefinidas. En una primera etapa, se generaron tres conjuntos de imágenes: 512 × 512 (3380 imágenes),1024 × 1024 (887 imágenes) y 2048 × 2048 (243 imágenes).

Posteriormente, para el desarrollo experimental se seleccionaron dos escalas contrastantes: 512 × 512 y 2048 × 2048 píxeles.

La selección de estas dimensiones permitió comparar dos estrategias de construcción de conjuntos de datos, con distintos niveles de contexto espacial y diferentes cantidades de muestras disponibles.

Identificación manual

El proceso de anotación se llevó a cabo en la plataforma Roboflow. Los árboles se identificaron manualmente mediante cuadros delimitadores (bounding boxes) trazados en cada imagen. El investigador estableció criterios de anotación para garantizar la consistencia en la delimitación de las copas visibles en el ortomosaico. Posteriormente, cada conjunto de datos se dividió en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba.

Entrenamiento del modelo YOLOv11

Los experimentos se realizaron en Google Colab utilizando la implementación oficial de YOLOv11. Cada conjunto de datos se entrenó por separado para evaluar cómo la resolución influye en el desempeño del modelo.

Los parámetros de entrenamiento incluyeron:

- Arquitectura: YOLOv11.
- Número de épocas: 300.
- Tamaño de imagen: 512 y 2048 píxeles.
- Función de pérdida: implementación por defecto de YOLOv11.

Evaluación del desempeño

El desempeño del modelo fue cuantificado utilizando las métricas estándar de detección de objetos:

Precisión
Mide la proporción de detecciones correctas respecto al total de detecciones realizadas.

$$\text{Precisión} = TP / (TP+FP)$$

Recall
Mide la capacidad del modelo para detectar correctamente los árboles presentes.

$$\text{Recall} = TP / (TP+FN)$$

F1-score
Representa el equilibrio entre precisión y exhaustividad.

$$F1 = 2 \times ((\text{Precision} \times \text{Recall}) / \text{Precision} + \text{Recall}))$$

Mean Average Precision (mAP)
Se evaluó mediante:
mAP@0.50
mAP@0.50:0.95

Las métricas fueron obtenidas automáticamente por YOLOv11 durante la etapa de validación.

Resultados y Discusión

Generación de conjuntos de datos (datasets) a distintas escalas espaciales
El ortomosaico RGB generado con Pix4D se segmentó mediante un algoritmo desarrollado en Python para obtener imágenes con diferentes dimensiones espaciales. El proceso generó 3380 imágenes de 512 × 512 píxeles, 887 de 1024 × 1024 píxeles y 243 de 2048 × 2048 píxeles. Para la evaluación, se seleccionaron dos escalas espaciales contrastantes: 512 × 512 y 2048 × 2048 píxeles. Posteriormente, el conjunto de datos se organizó en la plataforma Roboflow y se distribuyó de la siguiente manera: 81 % para entrenamiento, 10 % para pruebas y 9 % para validación, con el propósito de analizar el efecto de la resolución en el desempeño de YOLOv11 en la detección de árboles individuales.

Rendimiento del modelo entrenado con resolución de 512 × 512 píxeles
El modelo YOLOv11, entrenado con el conjunto de datos a una resolución de 512 × 512 píxeles, alcanzó un valor máximo de F1 de 0.70 con un umbral de confianza óptimo de 0.498, como se observa en la Figura 2. Asimismo, obtuvo un valor de mAP@0.50 de 0.676 y un mAP@0.50:0.95 de 0.39.

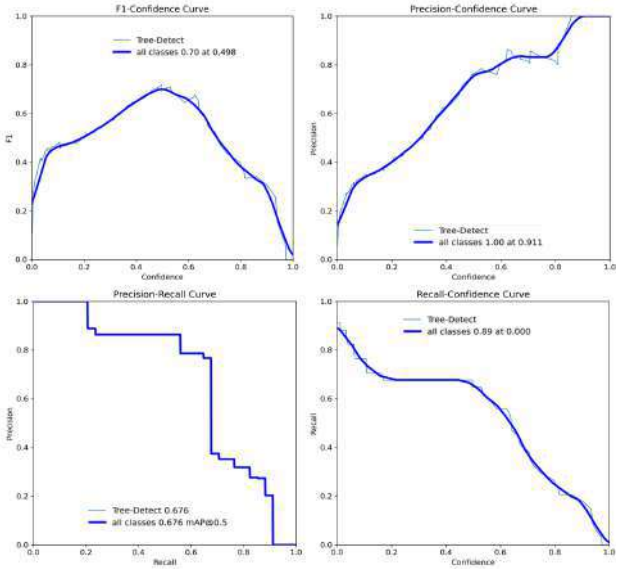


Figura 2. Desempeño del modelo YOLOv11 para 512 × 512

Desempeño del modelo entrenado con resolución de 2048 × 2048 píxeles
El modelo entrenado con imágenes de 2048 × 2048 píxeles mostró un mejor desempeño que el entrenado con la resolución más baja. Alcanzó un F1 máximo de 0.72 con un umbral de confianza de 0.556. Además, obtuvo un mAP@0.50 de 0.794 y un

mAP@0.50:0.95 de 0.45 a 0.46, como se muestra en la Figura 3.

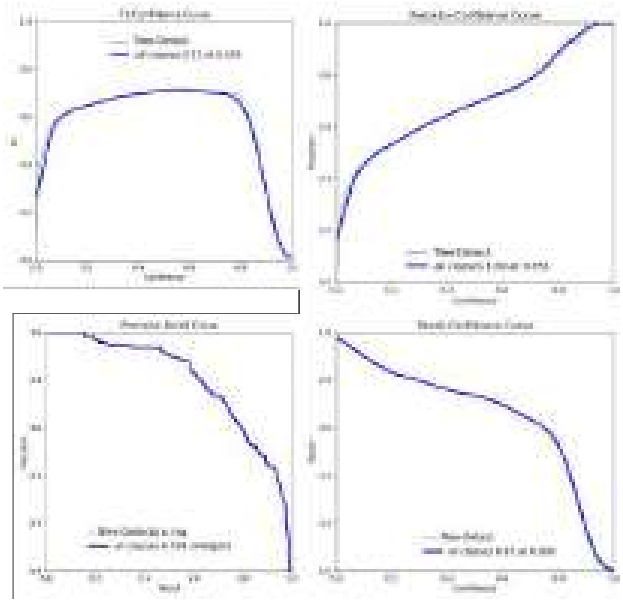


Figura 3. Desempeño del modelo YOLOv11 para 2048 × 2048

Las curvas de pérdida mostraron una disminución sostenida durante el entrenamiento, lo que refleja una capacidad de aprendizaje adecuada del modelo. La curva Precisión – Recall presentó un área bajo la curva superior a la obtenida con la resolución de 512 × 512 píxeles (Figura 2), mientras que la curva Recall – Confidence alcanzó un valor máximo cercano a 0.97. La matriz de confusión normalizada mostró que se detectó correctamente aproximadamente el 99 % de los árboles y que solo se omitió el 1 %. Las curvas de entrenamiento mostraron una disminución progresiva de las funciones de pérdida (box loss, classification loss y distribution focal loss), lo que sugiere una convergencia estable del modelo. La curva Precisión – Recall mostró que la precisión disminuía gradualmente a medida que aumentaba el recall, mientras que la curva Recall – Confidence alcanzó un valor máximo cercano a 0.89. La matriz de confusión normalizada indicó que se identificó correctamente aproximadamente el 91 % de los árboles del conjunto de validación, mientras que el 9 % restante no fue detectado.

Comparación del desempeño entre tamaños de resolución

Aunque el conjunto de datos generado a 512 × 512 píxeles tenían aproximadamente catorce veces más imágenes que el de 2048 × 2048 píxeles (3380 frente a 243), el modelo entrenado con la resolución más alta obtuvo mejores resultados en todas las métricas de evaluación consideradas.

Cuadro 1. Comparación del desempeño de YOLOv11 con diferentes tamaños de resolución

Metricas	VP 512 píxeles	VP 2048 píxeles
Imágenes	3380	243
Recall	0.89	0.97
mAP@50	0.676	0.794
mAP@50:95	0.40	0.46
F1 máximo	0.70	0.72
Umbral óptimo (confidence)	0.498	0.556
Precisión máxima	1	1

VP: valor promedio

El modelo entrenado con resolución de 2048 × 2048 píxeles aumentó el mAP@0.50 en aproximadamente un 17.5 % respecto al modelo entrenado con resolución de 512 × 512 píxeles. También se observaron mejoras en el mAP@0.50 (0.95), el recall máximo y el F1-score. Estos resultados muestran que el tamaño de las resoluciones empleadas al construir el conjunto de datos influyó en el desempeño final del modelo de detección de árboles individuales.

La comparación puede realizarse mediante el análisis de las coordenadas de cada polígono para determinar si representan el mismo árbol. Es importante distinguir las coincidencias reales de los pequeños solapamientos entre polígonos vecinos. Las 97 coincidencias son preliminares y se determinaron mediante un solapamiento espacial de, al menos, el 50 % del área del polígono menor. Para llevar a cabo un análisis científico, conviene revisar los casos ambiguos y comprobar que la correspondencia entre árboles sea uno a uno, ya que un mismo árbol de 2048 podría figurar como candidato para varios polígonos de 512.

Cuadro 2. Comparación de coincidencias en el conjunto de datos

Indicador	No. Arboles
Árboles detectados en 512	126
Árboles detectados en 2048	3235
Árboles con algún traslape (512)	105
Coincidencias probables (traslape ≥ 50%)	97
Árboles 512 sin traslape	21

Discusión

Los resultados muestran que la resolución utilizada para construir el conjunto de datos influyó significativamente en el desempeño de YOLOv11 en la detección de árboles individuales. El conjunto de 512 × 512 píxeles produjo 3380 imágenes de entrenamiento y alcanzó un mAP@0.50 de 0.676 y un F1-score máximo de 0.70. En cambio, el conjunto de 2048 × 2048 píxeles generó solo 243 imágenes, pero obtuvo un mAP@0.50 de 0.794 y un F1-score máximo de 0.72. Esto indica que aumentar el número de muestras de entrenamiento no necesariamente mejora el desempeño si la información espacial de cada imagen es limitada.

Una posible explicación de este comportamiento es la cantidad de contexto espacial que conserva cada resolución. Las imágenes de mayor tamaño ofrecen una representación más amplia de la estructura forestal y permiten que el modelo observe simultáneamente varias copas, sus patrones de distribución espacial y las relaciones entre árboles adyacentes. Este contexto puede facilitar la extracción de características discriminantes durante el entrenamiento y mejorar la localización de árboles individuales. Estudios recientes sobre la detección y segmentación de árboles mediante UAV han reportado resultados similares: la disponibilidad de información espacial influye directamente en la capacidad de los modelos para identificar correctamente las copas de los árboles (Lv *et al*., 2023; Luo *et al*., 2024).

El efecto observado coincide con los hallazgos de Hao *et al*. (2023), quienes demostraron que la resolución espacial de las imágenes y el tamaño de la copa interactúan de manera significativa en el desempeño de los modelos de aprendizaje profundo para detectar y delimitar árboles individuales. Los autores concluyeron que la cantidad de información espacial disponible es fundamental para el desempeño de los modelos, lo que sugiere que una resolución insuficiente puede limitar la detección de objetos forestales. Aunque su investigación se centró en la resolución espacial y no específicamente en el tamaño de la resolución, los resultados

del presente estudio sugieren que preservar el contexto espacial al construir el conjunto de datos produce un efecto similar en el aprendizaje del modelo.

Los resultados también sugieren un equilibrio entre la cantidad de muestras disponibles y el contexto espacial que recibe el algoritmo. Tradicionalmente, se considera que un mayor número de imágenes favorece el entrenamiento de redes neuronales profundas, pues aumenta la diversidad de ejemplos de aprendizaje. Sin embargo, los resultados muestran que las imágenes de 2048 × 2048 píxeles, aunque representan solo el 7.2 % de las generadas a 512 × 512 píxeles, alcanzaron valores superiores de mAP@0.50, mAP@0.50:0.95 y F1-score. Este hallazgo indica que, al detectar árboles individuales en ortomosaicos UAV, la calidad contextual de las muestras puede ser más importante que su cantidad total.

La mejora del 17.5% en mAP@0.50 observada con una resolución de 2048 × 2048 píxeles refuerza la hipótesis de que el contexto espacial es fundamental para la detección forestal basada en Deep Learning. Además, el aumento del Recall (de 0.89 a 0.97) indica una mayor capacidad para identificar los árboles presentes en el conjunto de validación. Estos resultados coinciden con investigaciones recientes que destacan la importancia de las relaciones espaciales entre las copas arbóreas y la estructura del dosel en aplicaciones de detección automática y de análisis forestal con UAV (Hofinger *et al*., 2023; Luo *et al*., 2024).

Desde una perspectiva metodológica, estos resultados tienen implicaciones prácticas para el diseño de conjuntos de datos destinados al monitoreo forestal con UAV. La mayoría de los estudios recientes se ha centrado en desarrollar nuevas arquitecturas o variantes mejoradas de YOLO para optimizar el rendimiento de los modelos de detección (Liu *et al*., 2024; Wang *et al*., 2025). Sin embargo, la preparación del conjunto de datos suele considerarse únicamente una etapa previa al entrenamiento y rara vez se analiza como un factor experimental independiente. Los resultados de esta investigación muestran que decisiones aparentemente simples, como la resolución empleada para dividir un ortomosaico, pueden generar diferencias importantes en el rendimiento de los modelos.

No obstante, este estudio presenta algunas limitaciones. La evaluación se llevó a cabo con un único ortomosaico, adquirido en la Universidad Forestal de Kagoshima, y solo se compararon dos escalas espaciales contrastantes (512 × 512 y 2048 × 2048 píxeles). Por ello, los resultados no permiten definir un tamaño óptimo universal para aplicaciones forestales. En futuras investigaciones, deberían incluirse tamaños intermedios, como 1024 × 1024 píxeles, así como distintos tipos de bosque, densidades de cobertura y condiciones ambientales, para determinar si los patrones observados se mantienen en diferentes escenarios forestales.

En conjunto, los hallazgos sugieren que optimizar la escala espacial durante la construcción del conjunto de datos puede ser tan importante como la selección de la

arquitectura de Deep Learning. Aunque gran parte de la literatura reciente se ha centrado en modificar y mejorar los detectores basados en YOLO (Liu *et al*., 2024; Wang *et al*., 2025), los resultados de este estudio indican que preservar el contexto espacial al generar las resoluciones puede mejorar sustancialmente la detección automática de árboles individuales. Por ello, la resolución debe considerarse una variable metodológica clave al desarrollar sistemas de monitoreo forestal basados en UAV e inteligencia artificial.

Conclusiones

La resolución utilizada para construir el conjunto de datos influyó significativamente en el desempeño de YOLOv11 al detectar automáticamente árboles individuales en ortomosaicos UAV. En todas las métricas evaluadas, las resoluciones de 2048 × 2048 píxeles obtuvieron mejores resultados que las de 512 × 512 píxeles.

Aunque contó con muchas menos imágenes de entrenamiento (243 frente a 3380), el modelo entrenado con una resolución de 2048 × 2048 píxeles obtuvo un mAP@0.50 de 0.794, superior al 0.676 del modelo entrenado con una resolución de 512 × 512 píxeles. Este resultado sugiere que preservar el contexto espacial en imágenes de mayor tamaño puede ser más importante que disponer de un mayor número total de muestras de entrenamiento.

La mejora en las métricas de desempeño sugiere que conservar información espacial adicional facilita la identificación de árboles individuales en entornos forestales y ofrece una representación más completa de las relaciones entre las copas y de la estructura del dosel.

Los resultados muestran que la preparación del conjunto de datos es una etapa crítica en los flujos de trabajo basados en Inteligencia Artificial y Deep Learning. Por ello, la resolución debe considerarse una variable metodológica relevante en futuros estudios sobre la detección automática de árboles mediante imágenes de UAV.

Desde una perspectiva de formación científica y tecnológica, este trabajo permitió adquirir experiencia en el uso de herramientas modernas de visión por computadora y aprendizaje profundo. Entre ellas se incluyen la creación de conjuntos de datos con Roboflow, el entrenamiento y la evaluación de modelos en Google Colab, y la implementación de algoritmos de detección de objetos basados en YOLOv11. Estas competencias proporcionan una valiosa base metodológica para futuras investigaciones en agricultura de precisión.

La metodología desarrollada durante esta estancia de investigación podrá adaptarse y aplicarse en futuros proyectos orientados al diseño y la construcción de una sembradora-fertilizadora de dosificación variable. En particular, podrá utilizarse en tareas de detección de objetos, identificación automática de cultivos, monitoreo del desarrollo vegetativo, generación de mapas de prescripción y desarrollo de sistemas de apoyo a la toma de decisiones basados en inteligencia artificial.

En futuras investigaciones, convendría evaluar resoluciones intermedias, incluir varios sitios forestales y comparar distintas configuraciones de entrenamiento para establecer criterios más sólidos para optimizar conjuntos de datos destinados al monitoreo forestal con UAV y Deep Learning.

Agradecimientos

En primer lugar, expreso mi más profundo agradecimiento a la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro y a la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León por brindarme la invaluable oportunidad de realizar mis estudios de doctorado en una institución tan prestigiosas. Agradezco también sinceramente al SECIHTI el valioso apoyo brindado mediante la beca. Asimismo, expreso un reconocimiento especial al PhD. Alejandro Isabel Luna Maldonado, cuya dirección, vasta experiencia, comprensión y adaptabilidad son fundamentales para llevar a buen término esta investigación.

Referencias Bibliográficas

Dubrovin, I., Fortin, C., & Kedrov, A. (2024). An open dataset for individual tree detection in UAV LiDAR point clouds and RGB orthophotos in dense mixed forests. Scientific Reports, 14(1), 21938. https://doi.org/10.1038/s41598-024-72669-5

Hao, Z., Lin, L., Post, C. J., Mikhailova, E. A., Yu, K., Fang, H., & Liu, J. (2023). The co-effect of image resolution and crown size on deep learning for individual tree detection and delineation. International Journal of Digital Earth, 16(1), 3753-3771. https://doi.org/10.1080/17538947.2023.2257636

Hofinger, P., Klemmt, H. J., Ecke, S., Rogg, S., & Dempewolf, J. (2023). Application of YOLOv5 for point label based object detection of black pine trees with vitality losses in UAV data. Remote sensing, 15(8), 1964. https://doi.org/10.3390/rs15081964

Liu, Y., Zhao, Q., Wang, X., Sheng, Y., Tian, W., & Ren, Y. (2024). A tree species classification model based on improved YOLOv7 for shelterbelts. Frontiers in plant science, 14, 1265025. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1265025

Luo, T., Rao, S., Ma, W., Song, Q., Cao, Z., Zhang, H., & Wu, D. (2024). YOLOTree-individual tree spatial positioning and crown volume calculation using UAV-RGB imagery and LiDAR data. Forests, 15(8), 1375. https://doi.org/10.3390/f15081375

Lv, L., Li, X., Mao, F., Zhou, L., Xuan, J., Zhao, Y., & Du, H. (2023). A deep learning network for individual tree segmentation in UAV images with a coupled CSPNet and attention mechanism. Remote Sensing, 15(18), 4420. https://doi.org/10.3390/rs15184420

Singh, H., Sharma, R., & Kumar, A. An Analysis of YOLO Variants for Effective Classification and Detection of Individual Palm Trees in UAV Imagery. International Journal of Computer Information

Systems and Industrial Management Applications, 18(2s), 1269–1276. https://doi.org/10.70917/ijcisim-2026-9998

Wang, Q., Pu, Z., Luo, L., Wang, L., & Gao, J. (2025). A Study on Tree Species Recognition in UAV Remote Sensing Imagery Based on an Improved YOLOv11 Model. Applied Sciences, 15(16), 8779. https://doi.org/10.3390/app15168779

Multi-agentes LLM para el control de riego y ventilación en plántulas de chile jalapeño

Pedro Jesús Camarena-Martínez[1*]; Guillermo Cristian Guadalupe Martínez-Ávila[1]; Romeo Rojas-Molina[1]; Adriana Gutiérrez-Díez[1]; Salvador Tututi-Ávila[2]; Nancy Medina-Herrera[1]
[1] Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León. Calle Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda El Canadá, Gral. Escobedo, N.L. C.P. 66054. México.
[2] Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolas de los Garza 66455, México.
*E-mail: pedro.camarenam@uanl.edu.mx

Resumen. Los agentes basados en modelos de lenguaje de gran escala (LLM) integran conocimiento agronómico y telemetría para orientar el manejo de invernaderos; sin embargo, transitar de la recomendación al control autónomo exige verificar la congruencia entre el razonamiento del modelo y la actuación física de los equipos. En este trabajo se integró un sistema multi-agente basado en un modelo de lenguaje de gran escala con un invernadero de chile jalapeño para evaluar la continuidad entre observación, decisión y actuación. El agente Watson utilizó telemetría ambiental, humedad del sustrato e indicadores térmicos del dosel para formular órdenes de riego y ventilación, con retroalimentación del evaluador agente Holmes y restricciones deterministas de ejecución. Durante cinco días se revisaron 30 ciclos de decisión. La concordancia entre razonamiento y decisión terminal fue de 73.3 %; las discrepancias se asociaron con la conservación del estado de ventilación y la selección de herramientas. La traducción a órdenes estructuradas presentó concordancias de 100 % para ventilación y 96.7 % para programación del riego. De 11 órdenes de riego, 10 tuvieron ejecución física verificada. Los registros permitieron identificar límites del evaluador y una interacción no prevista al cierre de la jornada. La validación documenta el funcionamiento y los fallos del sistema, sin establecer mejoras productivas ni ventajas frente a un controlador de referencia.
Palabras clave. Agente IA, estrés térmico, internet de las cosas, telemetría, trazabilidad.

Abstract. Large language models (LLM) agents integrate agronomic knowledge and telemetry to guide greenhouse management; however, transitioning from advisory support to autonomous control requires verifying consistency between model reasoning and physical equipment actuation. In this study, a large language model multi-agent was connected to a jalapeño greenhouse to assess continuity between observation, decision and actuation. Agent Watson used environmental telemetry, substrate moisture and canopy thermal indicators to formulate irrigation and ventilation commands, supported by feedback from the Holmes evaluator and deterministic execution constraints. Thirty decision cycles were reviewed over five days. Agreement between reasoning and terminal decisions was 73.3%; mismatches were associated with ventilation state persistence and tool selection. Translation into structured commands achieved agreement rates of 100% for ventilation and 96.7% for irrigation scheduling. Physical execution was verified for 10 of 11 irrigation commands. The records identified limitations of the evaluator and an unintended interaction at the end of the operating day. This operational validation documents system functioning and failures without establishing productivity gains or advantages over a reference controller.
Keywords. AI Agent, Internet of things, telemetry, thermal stress, traceability.

Introducción

El cambio climático plantea dificultades para la producción agrícola al alterar los patrones de temperatura y precipitación e intensificar el estrés térmico e hídrico de los cultivos. Sus efectos sobre los rendimientos y la seguridad alimentaria han impulsado estrategias de adaptación centradas en el manejo eficiente del agua y la resiliencia de los sistemas productivos (Begna & Wakweya, 2025). Las herramientas disponibles, los sensores y las tecnologías del internet de las cosas permiten observar las condiciones del cultivo y utilizar esa información para orientar el riego y el manejo de los recursos (Khan *et al*., 2021).

En invernadero, el riego puede programarse a partir de horarios, variables climáticas o mediciones del estado hídrico del sustrato y de la planta. Los sistemas de lazo abierto operan según una programación predefinida; los de lazo cerrado incorporan mediciones para ajustar el suministro de agua a las condiciones observadas (Nikolaou *et al*., 2019). Otra alternativa son los sensores virtuales, que estiman variables de interés mediante modelos. Sánchez-Molina *et al*., (2015), por ejemplo, estimaron el contenido de agua en un cultivo de tomate sobre fibra de coco considerando el crecimiento de las plantas, las características del sustrato y las pérdidas por transpiración y drenaje. Así, la programación puede apoyarse tanto en mediciones directas como en estimaciones del balance hídrico.

A estas estrategias se han sumado aplicaciones de inteligencia artificial que integran información de distintas fuentes para apoyar las decisiones de manejo. Los agentes basados en modelos de lenguaje de gran escala (LLM) combinan conocimiento agronómico con datos del entorno y herramientas externas de consulta (Tao *et al*., 2026). CottonBot ilustra este enfoque: recupera información técnica y consulta mediciones de humedad del suelo y pronósticos meteorológicos para formular recomendaciones de riego en algodón (Kandamali *et al*., 2025). El paso de la asesoría al control de equipos, sin embargo, exige examinar la fiabilidad de estas decisiones durante la operación (Tao *et al*., 2026).

Una recomendación pertinente no garantiza que el sistema actúe de manera congruente con ella. Los errores en las llamadas a herramientas pueden propagarse durante la ejecución y pasar inadvertidos si solo se evalúa el resultado final (Kokane *et al*., 2025). Incluso un plan coherente puede resultar inviable para las capacidades del equipo o las condiciones del entorno (Ichter *et al*., 2023). En un sistema de riego y ventilación, esto obliga a distinguir entre la intervención que el agente propone, la orden que emite y la acción que efectivamente realiza el equipo. Contrastar estas etapas permite localizar las discrepancias y precisar los límites de la operación.

Por ello, el objetivo de este trabajo fue describir la arquitectura de Watson, un agente basado en un LLM para controlar el riego y la ventilación en un invernadero con plántulas de chile jalapeño (*Capsicum annuum*), y evaluar la correspondencia entre su razonamiento, las órdenes emitidas y la ejecución física registrada. El

estudio se centró en la validación operativa y la identificación de inconsistencias, sin determinar efectos causales sobre el desempeño agronómico del cultivo.

Materiales y Métodos

Entorno experimental, monitoreo e indicadores ambientales

El trabajo se realizó en un invernadero de policarbonato de 8 m³ en el Centro de Agricultura Protegida de la Facultad de Agronomía, Campus de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Se establecieron plántulas de chile jalapeño (*Capsicum annuum*) mediante siembra el 20 de mayo de 2026 en charolas de 128 cavidades con turba. El invernadero contó con riego por microaspersión con agua de pozo abastecido por una bomba de diafragma, un extractor de aire y malla sombra exterior.

Se instalaron dos nodos de monitoreo, uno por mesa de plántulas, y un nodo de control para gestionar el riego y la ventilación. La comunicación se realizó mediante Firebase Realtime Database, con respaldo local de los registros. Los sensores y las variables medidas se presentan en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Sensores y variables medidas.

Sensor	Variable medida (unidades)
MLX90640	Temperatura del dosel (°C)
SHT30	Temperatura del aire (°C) y humedad relativa, HR (%)
Sensor capacitivo	Contenido volumétrico de agua, (%)
SN-300AL-GH-N01	Radiación fotosintéticamente activa, PAR ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

A partir de la temperatura y la humedad relativa del aire se calculó el déficit de presión de vapor, siguiendo la metodología de Allen *et al*. (1998). También se estimó el índice DANS (grados por encima de no estrés, por sus siglas en inglés) como la diferencia entre la temperatura del dosel y una referencia sin estrés (Nakabuye *et al*., 2022). Esta referencia se obtuvo mediante una regresión que incorporó temperatura del aire, déficit de presión de vapor y radiación fotosintéticamente activa, calibrada con 106 observaciones válidas entre las 09:00 y las 17:00 h.

Arquitectura del agente autónomo

El agente Watson, basado en Gemini-3.1-Flash-Lite, se organizó mediante un grafo dirigido con estado en LangGraph. El flujo recuperó datos de la base de datos en tiempo real de Firebase Realtime Database, verificó las señales y procesó la telemetría antes de la toma de decisiones. Las instrucciones generadas se convirtieron en órdenes estructuradas compatibles con el nodo de control, vinculando el análisis del agente con la ejecución del riego y la ventilación.

Ingeniería de instrucciones y división en subproblemas

Se utilizó una estrategia de asignación de rol para definir a Watson como un controlador especializado en el manejo del microclima de plántulas de chile jalapeño. Esta estrategia delimita las funciones del modelo y busca reducir la confusión entre dominios durante la inferencia (Wang *et al*., 2024). Las instrucciones incorporaron las restricciones del invernadero, las características del sustrato y las

posibilidades de los sistemas de riego y ventilación.

El contexto de decisión reunió temperatura y humedad relativa del aire, déficit de presión de vapor, radiación fotosintéticamente activa, temperatura del dosel, índice DANS y humedad del sustrato. También incluyó el estado de los actuadores, antecedentes de riego y retroalimentación del módulo evaluador Holmes. La duración del riego se relacionó con el volumen requerido y el caudal disponible. Cuando no se consideraba necesaria una intervención, se estableció una vía específica para registrar esa decisión.

El razonamiento se organizó mediante la división de tareas complejas en subproblemas más simples (Yu *et al*., 2023). El protocolo contempló el diagnóstico atmosférico y del sustrato, la pertinencia de la intervención según la etapa fenológica, las condiciones exteriores, la formulación de una propuesta de actuación y la confianza declarada por el modelo.

Reflexión y módulo evaluador

Se incorporó a Holmes como evaluador de las decisiones previas, inspirado en el enfoque de aprendizaje por refuerzo verbal descrito por (Shinn *et al*., 2023). Cuando existían antecedentes, el módulo contrastó la actuación propuesta y su justificación con las condiciones ambientales posteriores.

La evaluación consideró cambios en humedad del sustrato, temperatura del aire, déficit de presión de vapor y DANS. A partir de ellos, Holmes valoró el cumplimiento de los objetivos de la intervención, formuló hipótesis sobre posibles causas de desviación y propuso ajustes para el siguiente ciclo. Estas valoraciones constituyeron interpretaciones del evaluador; las diferencias entre mediciones no aislaron por sí mismas el efecto causal de los actuadores.

El informe resultante se incorporó al contexto de Watson antes de emitir nuevas órdenes, con el propósito de considerar el desempeño reciente en la decisión posterior.

Capa de seguridad determinista

Se integró una capa de validación para vincular las respuestas probabilísticas del LLM con las condiciones de ejecución del nodo de control. Esta capa convirtió las decisiones en órdenes estructuradas y aplicó restricciones independientes del modelo antes de enviarlas a Firebase Realtime Database.

Cuando el agente determinaba que no era necesario intervenir, el flujo generaba un registro estructurado de no actuación, sin recurrir a la traducción de una respuesta libre.

Cuando se requería intervenir, una etapa de traducción organizaba la decisión en un formato interpretable por el equipo. Posteriormente, se verificaban las restricciones de ejecución y la programación del riego antes de transmitir la orden al nodo de control.

Análisis del costo operativo

El costo de inferencia se calculó a partir del consumo de tokens de entrada y salida, aplicando tarifas de 0.25 y 1.50 USD por

millón de tokens, respectivamente. Con el gasto registrado se estimaron los costos semanal, mensual y anual, suponiendo una frecuencia de uso constante. Las proyecciones excluyeron los costos de instrumentación, energía, conectividad y mantenimiento.

Resultados y discusión

Grafo de ejecución del agente

La lógica de control de Watson se organizó como un grafo dirigido con estado, ejecutado en cada ciclo operativo (**Figura 1**). El flujo recupera la telemetría, el estado de los actuadores y la información del cultivo desde Firebase; posteriormente, excluye señales no válidas y calcula los indicadores ambientales. Antes del razonamiento, Holmes contrastó la decisión anterior con las condiciones observadas y generó retroalimentación. El agente también incorporó resúmenes del historial operativo, actualizados de manera acumulativa durante la evaluación, para contextualizar las tendencias de humedad, riego y temperatura.

El módulo de razonamiento integra esta información con las restricciones físicas del invernadero y puede consultar herramientas meteorológicas externas mediante un ciclo limitado de consultas. La decisión final sigue dos rutas: cuando se requiere intervenir, la propuesta se convierte en órdenes estructuradas, se aplican restricciones deterministas y se registra la programación para el nodo de control; cuando no se considera necesaria una intervención, se registra directamente una decisión de no actuación. Esta organización permite seguir el recorrido desde la interpretación del entorno hasta la preparación de las órdenes para su ejecución física.

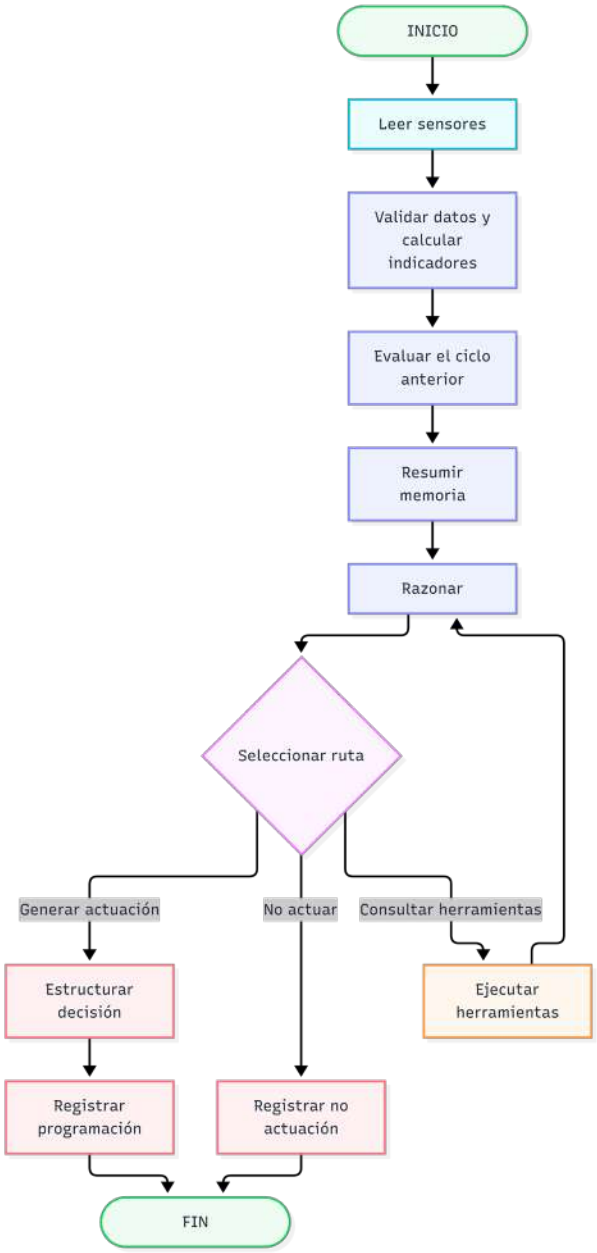


Figura 1. Flujo de decisión y ejecución del agente Watson por ciclo.

Cumplimiento del protocolo de razonamiento y confianza declarada

Los 30 ciclos analizados siguieron el protocolo establecido. En los 16 ciclos de no actuación, el agente consultó el clima

exterior y posteriormente registró la decisión de no intervenir; los 14 ciclos de actuación incluyeron la consulta meteorológica antes de emitir la decisión.

La confianza declarada presentó una media de 0.933 y un intervalo de 0.85–0.98, con valores elevados incluso ante respuestas contradictorias. El mínimo de 0.85 se registró en dos ocasiones: una por interrupción de la consulta meteorológica y otra por un desacuerdo entre Holmes y Watson. Estas observaciones sugieren sensibilidad a la falta de contexto y al conflicto entre evaluador-evaluado.

Evaluación de Holmes y respuesta de Watson

Holmes clasificó 22 evaluaciones como incorrectas, tres como críticas, tres como correctas y dos como parcialmente eficaces. Estas categorías representan la valoración del propio módulo evaluador y no un dictamen agronómico independiente. La revisión de los registros sugirió que parte de la severidad estuvo relacionada con una representación incompleta de las restricciones físicas del invernadero.

Holmes penalizó la falta de reducción de temperatura mediante ventilación sin considerar suficientemente las limitaciones del extractor frente a las condiciones exteriores. Este comportamiento sugiere una contextualización insuficiente del evaluador, consistente con las dificultades descritas para los jueces LLM al aplicar criterios dependientes del contexto(Xu *et al*., 2025). Por ello, el crítico requiere, al igual que Watson, información sobre las capacidades de los actuadores y las restricciones del entorno. Las valoraciones favorables se concentraron por la mañana o por la tarde, lo que limita la separación entre el efecto de las acciones y la variación ambiental e impide atribuirles una eficacia causal.

Correspondencia entre razonamiento y decisión

La concordancia entre las justificaciones y la decisión terminal se observó en 22 de los 30 ciclos, equivalentes al 73.3 %. Los ocho restantes, correspondientes al 26.7 %, presentaron una discrepancia: el razonamiento favoreció intervenir o mantener una intervención, mientras la decisión terminal se registró como no actuación. La revisión identificó dos causas distintas, con cuatro casos en cada una.

La primera causa correspondió a un defecto determinista de la vía de no intervención. Cuando el agente expresaba la intención de mantener la ventilación que ya estaba activa, esa vía generaba una orden de apagado. Se confundían así la ausencia de un cambio solicitado y la ausencia de ventilación requerida.

La segunda causa se atribuyó a una inconsistencia del modelo al seleccionar la herramienta, identificada en cuatro ciclos. Aunque Watson describió una intervención, invocó la función de no actuación, incompatible con el plan formulado. El fallo se localizó en la llamada emitida por el LLM, no en el código que la ejecutó. Este comportamiento ilustra cómo una llamada incorrecta puede desviar el curso de ejecución del agente, en consonancia con los errores de uso de herramientas analizados por Kokane *et al*., (2025).

Traducción de órdenes y ejecución física

La concordancia de la traducción a órdenes estructuradas fue de 100 % para ventilación y 96.7 % para riego. La única discrepancia ocurrió cuando la duración del riego se recuperó del contexto de Holmes porque Watson no la especificó. De 11 órdenes de riego enviadas, 10 se ejecutaron físicamente; la causa de la omisión se debe a un error de memoria en el microcontrolador. En el ciclo posterior, la disminución de humedad y la ausencia de flujo motivaron un riego de mayor duración, que sí se ejecutó. Este caso documenta una respuesta mediante retroalimentación, sin establecer una capacidad general de recuperación ante fallos.

Consumo computacional y costo de inferencia

Las 111 llamadas registraron aproximadamente 2,010 tokens de entrada y 330 tokens de salida por solicitud. El costo acumulado de inferencia durante los cinco días fue de 0.1108 USD. Las proyecciones fueron de 0.155 USD por semana, 0.664 USD por mes y 8.085 USD por año, bajo los supuestos de frecuencia y precios empleados en el análisis.

Conclusión

La integración de Watson con el invernadero permitió documentar el recorrido desde la observación ambiental hasta las órdenes y la ejecución física del riego. La validación identificó discrepancias en la selección de herramientas, en la conservación del estado de ventilación y en la ejecución de una orden por el equipo. También permitió reconocer restricciones del evaluador y del cierre de la jornada operativa. La identificación de estos problemas durante los cinco días de seguimiento aporta evidencia para orientar su corrección y verificar una implementación más robusta. Este proceso sienta las bases para futuras comparaciones entre controladores de riego que permitan evaluar su desempeño operativo y sus efectos agronómicos.

Agradecimientos

A la Facultad de Agronomía de la UANL, al SECIHTI por la beca otorgada (CVU: 1232403); y al Programa de Apoyo a la Ciencia, Tecnología e Innovación (ProACTI 2025-2026) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (claves: 147-IDT-2023 y 32-IDT-2024).

Referencias Bibliográficas

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO.

Begna, T., & Wakweya, R. B. (2025). Climate-Smart Agriculture: Effect of Climate Change on Food Security and Its Mitigation Strategies. In International Journal of Agronomy (Vol. 2025, Number 1). John Wiley and Sons Ltd. https://doi.org/10.1155/ioa/9972955

Ichter, B., Brohan, A., Chebotar, Y., Finn, C., Hausman, K., Herzog, A., Ho, D., Ibarz, J., Irpan, A., Jang, E., Julian, R., Kalashnikov, D., Levine, S., Lu, Y., Parada, C., Rao, K., Sermanet, P., Toshev, A. T.,

Vanhoucke, V., Fu, C. K. (2023). Do As I Can, Not As I Say: Grounding Language in Robotic Affordances. In K. Liu, D. Kulic, & J. Ichnowski (Eds.), Proceedings of The 6th Conference on Robot Learning (Vol. 205, pp. 287–318). PMLR. https://proceedings.mlr.press/v205/ichter23a.html

Kandamali, D. F., Porter, W. M., Porter, E., McLemore, A., & Rains, G. C. (2025). CottonBot: An AI-driven cotton farming assistant and irrigation advisor using LLM-RAG and agentic AI tools. Smart Agricultural Technology, 12. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101640

Khan, N., Ray, R. L., Sargani, G. R., Ihtisham, M., Khayyam, M., & Ismail, S. (2021). Current progress and future prospects of agriculture technology: Gateway to sustainable agriculture. In Sustainability (Switzerland) (Vol. 13, Number 9). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/su13094883

Kokane, S., Zhu, M., Awalgaonkar, T., Zhang, J., Hoang, T., Prabhakar, A., Liu, Z., Lan, T., Yang, L., Tan, J., Murthy, R., Yao, W., Liu, Z., Niebles, J. C., Wang, H., Heinecke, S., Xiong, C., & Savarese, S. (2025). ToolScan: A Benchmark for Characterizing Errors in Tool-Use LLMs. http://arxiv.org/abs/2411.13547

Nakabuye, H. N., Rudnick, D., DeJonge, K. C., Lo, T. H., Heeren, D., Qiao, X., Franz, T. E., Katimbo, A., & Duan, J. (2022). Real-time irrigation scheduling of maize using Degrees Above Non-Stressed (DANS) index in semi-arid environment. Agricultural Water Management, 274. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107957

Nikolaou, G., Neocleous, D., Katsoulas, N., & Kittas, C. (2019). Irrigation of greenhouse crops. In Horticulturae (Vol. 5, Number 1). MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute. https://doi.org/10.3390/horticulturae5010007

Sánchez-Molina, J. A., Rodríguez, F., Guzmán, J. L., & Ramírez-Arias, J. A. (2015). Water content virtual sensor for tomatoes in coconut coir substrate for irrigation control design. Agricultural Water Management, 151, 114–125. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.013

Shinn, N., Cassano, F., Gopinath, A., Narasimhan, K., & Yao, S. (2023). Reflexion: language agents with verbal reinforcement learning. Advances in Neural Information Processing Systems 36, 8634–8652. https://doi.org/10.52202/075280-0377

Tao, W., Sang, Q., Chen, C., & Mao, Q. (2026). Intelligent Agents for Smart Agriculture: Architectures, Applications, and Future Challenges. In Agriculture (Switzerland) (Vol. 16, Number 17). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).

https://doi.org/10.3390/agriculture16171808

Wang, R., Mi, F., Chen, Y., Xue, B., Wang, H., Zhu, Q., Wong, K.-F., & Xu, R. (2024). Role Prompting Guided Domain Adaptation with General Capability Preserve for Large Language Models. Findings of the Association for Computational Linguistics: NAACL 2024, 2243–2255. https://doi.org/10.18653/v1/2024.findings-naacl.145

Xu, A., Bansal, S., Ming, Y., Yavuz, S., & Joty, S. (2025). Does Context Matter? ContextualJudgeBench for Evaluating LLM-based Judges in Contextual Settings. http://arxiv.org/abs/2503.15620

Yu, Z., He, L., Wu, Z., Dai, X., & Chen, J. (2023). Towards Better Chain-of-Thought Prompting Strategies: A Survey. http://arxiv.org/abs/2310.04959

Capacidad depredadora de dos especies de Coccinélidos sobre mosquita blanca *Trialeurodes vaporariorum* (Hemíptera: Aleyrodidae)

Abigail Esmeralda Aguilar-Rocha[1*]; Lidia Rosaura Salas-Cruz[1]; Orquídea Pérez-González[2]; Laiju Kuzhuppillymyal-Prabhakarankutty[3]; Emilio Olivares-Sáenz[1]; Miguel Ángel Dector-Carrillo[1].
[1]Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050.
[2]Facultad de Ciencias Biológicas, UANL, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, CP 66455.
[3]The University of Texas Rio Grande Valey, 1937 Bustamente St, Laredo TX 78 Estados Unidos.
*Email: abigail.aguilarrc@uanl.edu.mx

Resumen. Una de las plagas más agresivas en los cultivos hortícolas es la llamada comúnmente mosquita blanca, ésta puede debilitar a la planta por el consumo de savia y a la vez transmitir virus fitopatógenos. El control biológico constituye uno de los métodos de manejo más utilizados y se basa en el empleo de organismos benéficos, entre los que destacan los depredadores. Insectos como las catarinas (Coleóptera: Coccinellidae), se caracterizan por ser polífagas y se ha logrado su reproducción en laboratorio para ser posteriormente liberados en varios cultivos. En el presente estudio se analizó la capacidad depredadora de *Hippodamia convergens* y *Harmonia axyridis* sobre ninfas de *Trialeurodes vaporariorum*. Se evaluaron por individual seis ejemplares de larvas y adultos de los coccinélidos exponiéndolos durante veinticuatro horas de ayuno, para después alimentarse durante una hora sobre una hoja de tomate infestada de mosquita blanca. Los porcentajes de depredación fueron 43.5 % y 29.3 % para los adultos y las larvas de *H. convergens*, respectivamente, mientras que para el adulto de *H. axyridis* fue de 31.5%; sin embargo, no existió diferencia significativa, demostrando la eficiencia de ambas etapas de desarrollo de los Coccinélidos para combatir la plaga de mosquita blanca.
Palabras clave. Control biológico, *Hippodamia convergens*, *Harmonia axyridis*.

Abstract. One of the most aggressive pests in horticultural crops is the whitefly, which can weaken plants by consuming sap and transmitting phytopathogenic viruses. One of the control methods used is biological control, which includes predators among various beneficial organisms. Insects such as ladybugs (Coleoptera: Coccinellidae) are polyphagous and have been successfully bred in the laboratory for subsequent release in various crops. In this study, the predatory capacity of Hippodamia convergens and *Harmonia axyridis* on *Trialeurodes vaporariorum* nymphs was analyzed. Six individual specimens of larvae and adults of these ladybugs were evaluated by fasting for 24 hours and then feeding for one hour on a tomato leaf infested with whiteflies. The predation percentages were 43.5% and 29.3% for adults and larvae of *H. convergens*, respectively, while for the adult of *H. axyridis* it was 31.5%; however, there was no significant difference, demonstrating the efficiency of these two stages of Coccinellids to combat the whitefly plague.
Keywords: Biological control *Hippodamia convergens*, *Harmonia axyridis*.

Introducción

Una de las plagas agrícolas de mayor importancia es un grupo de insectos llamados moscas o mosquitas blancas, éstos pertenecen al orden Hemíptera y familia Aleyrodidae, la cual se caracteriza por tener las alas en forma de techo sobre el cuerpo cuando el insecto está en reposo, su cabeza es relativamente larga y comprimida al tórax y posee un desarrollado aparato bucal picador-chupador (Figura 1) (Patel *et al.*, 2022).



Figura 1. Huevos, ninfas y adulto de mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum*) Fuente: https://panorama-agro.com/?p=2650

Las moscas blancas causan daños sustanciales y pérdidas económicas a los cultivos susceptibles. Tanto las ninfas como la etapa adulta chupan la savia y, mientras se alimentan, excretan melaza (excrementos azucarados) que promueven la fumagina en el follaje y los frutos, lo que provoca efectos adversos en la productividad de los cultivos. Las plantas afectadas muestran coloración amarillenta, plegamiento del follaje, disminución del desarrollo de las plantas y frutos deformes. Las ninfas inyectan enzimas durante la alimentación que alteran la fisiología del cultivo y, en consecuencia, dan como resultado una disminución de la pigmentación interna y una maduración anormal de la fruta. Además, transmiten más de 300 virus patógenos a más de 1000 cultivos en todo el mundo. Las especies de moscas blancas más conocidas son *Bemisia tabaci* y *Trialeurodes vaporariorum*. Estas especies se encuentran entre las plagas de insectos más destructivas en cultivos agrícolas, hortalizas y plantas ornamentales (Abubakar *et al.*, 2022).

La presencia de *T. vaporariorum* en el cultivo de tomate es consistente con reportes previos en sistemas de producción bajo invernadero, donde esta especie se reconoce como una de las plagas más importantes debido a su capacidad de transmisión de virus fitopatógenos y su impacto en la fisiología de la planta (Nasruddin y Mound, 2016).



Figura 2. Virus de la clorosis del tomate, planta infectada a la izquierda y sana a la derecha. Fuente: Fiallo-Olivé *et al.* (2020).

Esta especie transmite diversos crinivirus, incluyendo el virus del pseudoamarilleo de la remolacha (BPYV), el virus asociado a la palidez de la fresa (SPaV), el virus de la clorosis del tomate (ToCV) (Figura 2) y el virus de la clorosis infecciosa del tomate (TICV), los cuales han generado pérdidas significativas en la producción de hortalizas y frutas en distintas regiones del mundo (Wintermantel, 2004).

Existen varios métodos de control de plagas, el más utilizado es el químico, sus resultados pueden ser a corto plazo, pero sin la correcta aplicación y en uso excesivo, puede ser contraproducente llegando a contaminar el ambiente y afectar la salud del consumidor, sin olvidar, que la plaga puede producir resistencia a los ingredientes activos (Chirinos *et al*., 2020). Una alternativa es implementar el control biológico, que consiste en liberar organismos vivos como bacterias, hongos, virus e insectos que sean capaces de atacar según sea la plaga objetivo (Pacheco *et al*., 2019).

Dentro del orden Coleóptera, se encuentran algunas especies de la familia Coccinellidae comúnmente conocidas como catarinas, éstas se consideran insectos útiles y uno de los mayores aliados de los agricultores y jardineros actuando como depredadores contra las plagas. Todas pasan por cuatro etapas de desarrollo: huevo, larva, pupa y adulto (Figura 3), aunque cada especie tiene un tiempo de desarrollo diferente (Kumar y Omkar, 2023).

Algunas catarinas complementan su dieta con polen o néctar, y al menos un grupo (Tribu: Halyziini) es principalmente micófago. Los escarabajos depredadores exhiben una naturaleza depredadora contra muchas plagas de insectos de cuerpo blando como pulgones (Aphididae: Hemíptera), cochinillas (Pseudococcidae: Hemíptera), moscas blancas (Aleyrodidae: Hemíptera), trips (Thripidae: Thysanoptera), cicadélidos (Cicadellidae: Hemíptera) y psílidos (Psyllidae; Hemíptera) (Kundoo y Khan, 2017).

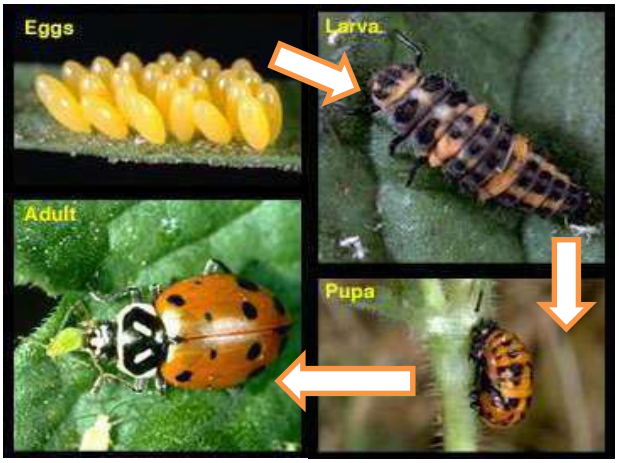


Figura 3. Etapas de vida de *Hippodamia convergens* Fuente: https://www.ecoterrazas.com/blog/las-beneficiosas-mariquitas-de-siete-puntos-2/.

Entre las especies más conocidas se encuentra *Hippodamia convergens*, con un ciclo de vida de 60 días en promedio, llegando a ovipositar 485 huevos. Esta especie es un eficiente depredador debido a que en la etapa de larva puede llegar a consumir 178 pulgones (*Aphis spiraecola*, Hemiptera: Aphididae) por día (Sánchez-Antezana *et al.*, 2022). Otras especies de esta familia pueden tener diferente capacidad depredadora entre machos y hembras adultos, como lo expone Catizim *et al.* (2024) en la especie *Coccinella septempunctata*; donde las hembras fueron más voraces, consumiendo 2.67 veces más presas de escamas *Ferrisia virgata* que los machos; alcanzando un máximo de 10.2 presas en 24 horas.

El objetivo del presente estudio es identificar las especies de coccinélidos presentes en el Centro de Agricultura Protegida de la FAUANL y, seleccionar dos especies (*Hippodamia convergens* y *Harmonia axyridis*), para determinar su capacidad depredadora sobre *Trialeurodes vaporariorum*.

Materiales y Métodos

Una cría de depredadores fue establecida en el Laboratorio de Entomología y Fitopatología para reproducir insectos de la familia Coccinellidae, específicamente aquellos llamados comúnmente catarinas; los insectos fueron capturados al interior y en los alrededores de los invernaderos ubicados en las instalaciones de la Centro de Agricultura Protegida de la FAUNAL, posteriormente fueron transferidos al laboratorio, en donde se colocaron en cajas Petri para facilitar las observaciones, y se mantuvieron a una temperatura de 25±2°C. La alimentación de los depredadores consistió en mosquitas blancas provenientes de hojas de tomate y maleza. Todos los coccinélidos fueron identificados mediante las claves taxonómicas de Gordon (1985) y Celli *et al.* (2021), y se conservaron hasta obtener adultos y larvas de dos especies diferentes.

Para el experimento, se utilizó como unidad experimental una caja Petri con una hoja de tomate infestada con mosca blanca (*T. vaporariorum*), se excluyeron los adultos y se contabilizaron las ninfas del segundo al cuarto estadío con ayuda de un estereoscopio.

El experimento se estableció con un diseño experimental completamente al azar en donde se evaluaron cuatro tratamientos: adulto de *Hipodamia convergens*, larva de tercer ínstar *Hipodamia convergens*, adulto de *Harmonia axyridis* y larva de *Harmonia axyridis* con seis repeticiones cada uno (Figura 4). El tratamiento de la larva de *Harmonia axyridis* se eliminó debido a que las larvas no sobrevivieron el traslado a las cajas Petri.

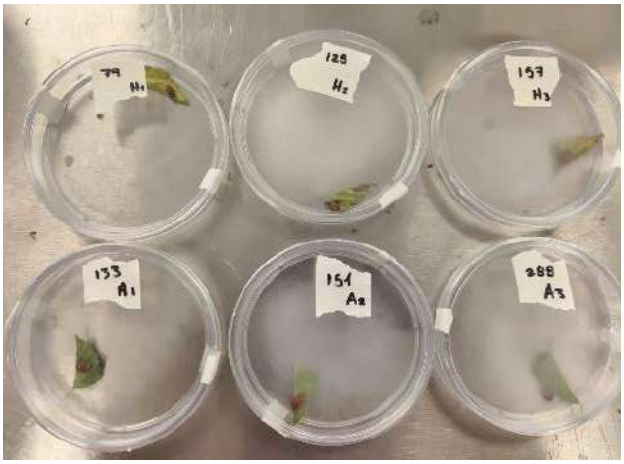


Figura 4. Unidades experimentales usados en el experimento de capacidad de depredación.

Los adultos y larvas de las catarinas se expusieron a un ayuno de 24 horas y posteriormente se introdujeron a cada caja Petri con las hojas infestadas de un promedio de 212 ninfas de mosquita blanca en cada hoja, en donde se alimentaron durante una hora, posteriormente se retiraron de las hojas para contabilizar las ninfas que no fueron consumidas y por diferencia se obtuvo el total de ninfas consumidas en cada una de las cajas Petri.

Los datos de presas consumidas se convirtieron a porcentaje usando la siguiente ecuación:

$$\%\ depredación = \left(\frac{N°\ presas\ consumidas}{N°\ presas\ expuestas}\right) \text{x}100$$

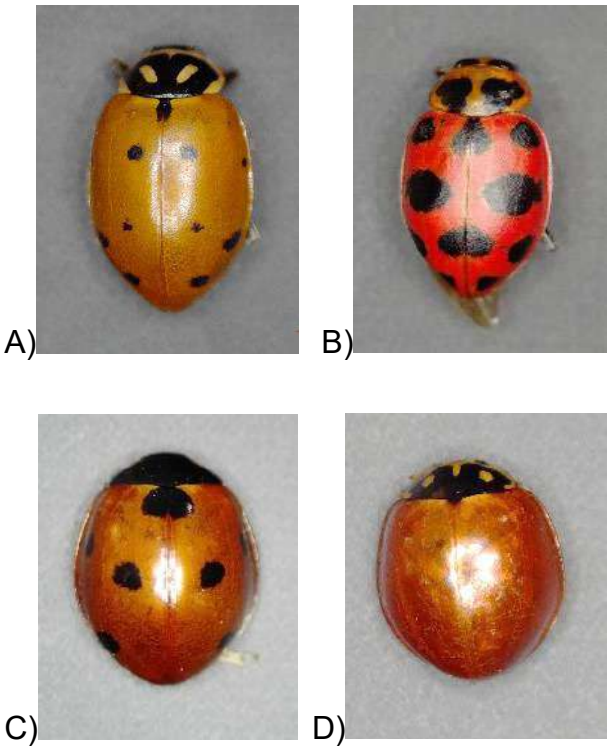
Los datos de porcentaje fueron transformados usando arcoseno y posteriormente los tratamientos fueron comparados con la técnica no paramétrica de Kruskal-Wallis con nivel de significancia de p=0.05 (López-Luque *et al.*, 2021). Los análisis estadísticos se realizaron utilizando

el software Diseños Experimentales FAUANL (Olivares, 2019).

Resultados y Discusión

Las especies de coccinélidos identificados fueron *Hippodamia convergens* de 12, 10, 8, 4 y 2 manchas en los élitros; *Coleomegilla maculata*, *Coccinella septempunctata*, *Cycloneda sanguínea*, *Olla V-Nigrum* y *Harmonia axyridis* (Figura 5).

De éstos se eligieron ejemplares de *H. convergens* y *H. axyridis* para desarrollar el experimento, ya que se adaptaron mejor a las condiciones del establecimiento de cría y se logró coincidir con la captura de machos y hembras de la misma especie para su reproducción.



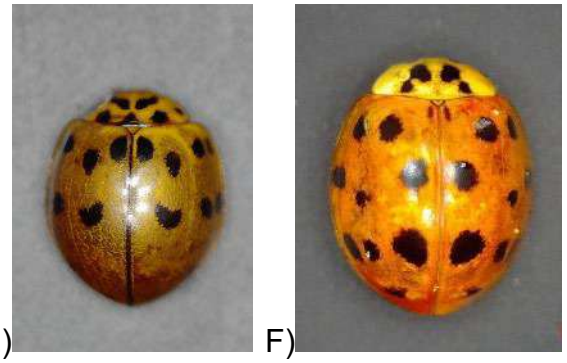


Figura 5. Especies identificadas dentro de las instalaciones de la FAUANL. A) *Hippodamia convergens*, B) *Coleomegilla maculata*, C) *Coccinella septempunctata*, D) *Cycloneda sanguínea*, E) *Olla V-nigrum*, F) *Harmonia axyridis*

El consumo de presas por las catarinas osciló entre 38 y 162 ninfas en los adultos, y entre 18 y 96 ninfas en las larvas (Figura 4). El porcentaje promedio de depredación fue de 43.5 % y 29.3 % para los adultos y las larvas de *H. convergens*, respectivamente, mientras que para el adulto de *H. axyridis* fue de 31.5%. Aunque se observaron diferencias en la capacidad depredadora entre las especies evaluadas, estas no fueron estadísticamente significativas (Figura 6), debido a que había variación importante dentro de cada tratamiento (CV = 21%).

La mayor capacidad de consumo observada en los adultos coincide con lo reportado para diversos coccinélidos, cuyos requerimientos energéticos asociados al mantenimiento, dispersión y reproducción favorecen mayores tasas de alimentación en comparación con los estadios inmaduros (Musa *et al.* 2026). Estos resultados respaldan la importancia de considerar tanto la especie como el estadio de desarrollo en la evaluación de enemigos naturales, aunque también sugieren que otros factores, como la densidad de la presa, las características de la planta

hospedera o las condiciones ambientales, podrían ejercer una influencia más determinante sobre la eficiencia depredadora (Aigbedion-Atalor *et al.*, 2026; Yang *et al.*, 2022).

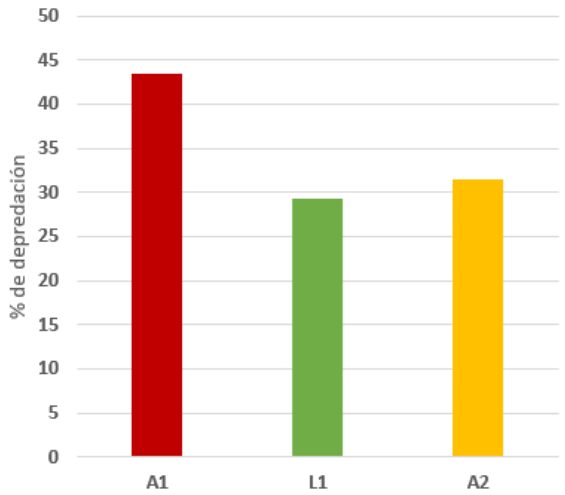


Figura 6. Porcentaje de depredación promedio de adultos y larvas de dos especies de coccinélidos. A1= Adulto de *Hippodamia convergens*, L1= Larva de *Hippodamia convergens*, A2= Adulto de *Harmonia axydris*

Conclusiones

Se logró la identificación de seis especies de coccinélidos presentes en las instalaciones del Centro de Agricultura Protegida de la FA-UANL. Los hallazgos en cuanto a la capacidad depredadora de *H. convergens* y *H.* axyridis indican que ambas especies constituyen agentes promisorios para el control biológico de *T. vaporariorum*, particularmente durante el estadío adulto, siendo *Hippodamia convergens* quien registró los mayores niveles de consumo.

Los resultados del estudio mostraron la importancia que tienen las especies de la familia *Coccinelidae* en el control biológico de mosca blanca.

Agradecimientos

Agradecimiento especial a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo de manutención otorgada mediante la beca 001855. Las fuentes del financiamiento de la presente investigación proceden del Proyecto CONAHCYT Clave: Renajeb-2023-10 y Proyecto Ciencia Básica A1-S-33091.

Al Centro de Agricultura Protegida por las facilidades para la colecta de insectos y a los estudiantes de licenciatura Kattya Ximena Silva Patena y Max Mireles Santana por el apoyo en el establecimiento de la cría de coccinélidos.

Referencias Bibliográficas

Abubakar, M., Koul, B., Chandrashekar, K., Raut, A., & Yadav, D. (2022). Whitefly (*Bemisia tabaci*) management (WFM) strategies for sustainable agriculture: A review. Agriculture, 12(9), 1317.

Aigbedion-Atalor, I., Azrag, A. G., Simmons, A. M., & Schmidt, J. M. (2026). Life-stage specific predatory efficiency of 2 generalist predators of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). Journal of economic entomology, toag151.

Catzim, C. E. A., Cupul, W. C., Juárez, M. G., Batalla, B. M. M., Millán, J. A., & Ruiz, A. G. (2024). Predatory Capacity and Functional Response of *Coccinella septempunctata* Linnaeus (Coleoptera: Coccinellidae) on Ferrisia virgata Cockerell (Hemiptera:

Pseudococcidae). *Proceedings of the Entomological Society of Washington*, *126*(2), 129-136.

Celli, N. D. G. D. R., Almeida, L. M., Basílio, D. S., & Castro, C. F. (2021). The way to maturity: taxonomic study on immatures of Southern Brazilian Coccinellini (Coleoptera: Coccinellidae) species important in biological control. Zoologia (Curitiba), 38, e64154.

Chirinos, D. T., Castro, R., Cun, J., Castro, J., Peñarrieta, S., Solis, L., & Geraud, F. (2020). Los insecticidas y el control de plagas agrícolas: la magnitud de su uso en cultivos de algunas provincias de Ecuador. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 21(1), e1276

Fiallo-Olivé, E., Pan, L. L., Liu, S. S., & Navas-Castillo, J. (2020). Transmission of begomoviruses and other whitefly-borne viruses: dependence on the vector species. Phytopathology, 110(1), 10-17.

Gordon, R. D. (1985). The Coccinellidae (Coleoptera) of America north of Mexico.

Kundoo, A. A., & Khan, A. A. (2017). Coccinellids as biological control agents of soft bodied insects: A review. Journal of Entomology and Zoology Studies, 5(5), 1362-1373.

Kumar, B., & Omkar (2023). Insect predators. In Insect predators in pest management (pp. 187-228). CRC Press.

Li, Y.; Mbata, G.N.; Punnuri, S.; Simmons, A.M.; Shapiro-Ilan, D.I. (2021). *Bemisia tabaci* on Vegetables in the Southern United States: Incidence, Impact, and Management. Insects, 12, 198.

López-Luque, E. B., Cortez-Mondaca, E., Valenzuela-Hernández, J. I., Camacho-Báez, J. R., & Sánchez-Gutiérrez, Y. (2021). Capacidad de Depredación de Coccinellidae sobre el Pulgón Amarillo del Sorgo1 en Sinaloa, México. Southwestern Entomologist, 46(2), 497-502.

Musa, N. N., Mohammed, M. A., & Yaakop, S. (2026). Survival of predatory ladybirds (Coleoptera: Coccinellidae): interplay of behavior, agricultural practices and symbiotic relationships. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 36(1), 9.

Nasruddin, A., & Mound, L. A. (2016). First record of *Trialeurodes vaporariorum* Westwood (Hemiptera: Aleyrodidae) severely damaging field grown potato crops in South Sulawesi, Indonesia. Journal of plant protection research, 56(2).

Olivares-Sáenz, E. (2019). Diseños Experimentales FAUANL. Facultad de Agronomía, UANL.

Pacheco Hernández, M. de L., Reséndiz Martínez, J. F., Arriola Padilla, V. J. (2019). Organismos entomopatógenos como control biológico en los sectores agropecuario y forestal de México: una revisión. Revista Mexicana De Ciencias Forestales, 10(56).

Patel, C., Srivastava, R. M., & Samraj, J. M. (2022). Comparative study of morphology and developmental biology of two agriculturally important whitefly species Bemisia tabaci (Asia II 5) and *Trialeurodes vaporariorum* from North-Western Himalayan region of India. Brazilian Archives of Biology and Technology, 65, e22210034.

Sánchez-Antezana, C. A., Narrea-Cango, M., & Iannacone, J. (2022). Biología, capacidad depredadora y comportamiento de *Hippodamia convergens* Guérin-Meneville,

1842. Revista Sustinere, 10, 105-129.

Yang, Q., Liu, J., Wyckhuys, K. A., Yang, Y., & Lu, Y. (2022). Impact of heat stress on the predatory ladybugs *Hippodamia variegata* and *Propylaea quatuordecimpunctata*. Insects, 13(3), 306.

Wintermantel, W. M. (2004). Emergence of greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*) transmitted criniviruses as threats to vegetable and fruit production in North America. APSnet Features. doi, 10.

Caracterización fisicoquímica y estructural de microcápsulas de ficocianina en matrices de quitosano y su efecto en el crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.)

Arely Irasema Ruiz-García[1*]; Celestino García-Gómez[1]; Adriana Pacheco-Moscoa[2]; Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena[1]; Carlos Alberto Garza-Alonso[1]; Sanjuana Cecilia Galicia-Campos[1].
[1]Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399.
[2]Escuela de Ingeniería y Ciencias. Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey. Av. Eugenio Garza Sada 2501 Col. Tecnológico, Monterrey, Nuevo León, México. C.P 64700. Tel. (81) 8358 2000.
*Email: arely.ruizgr@uanl.edu.mx

Resumen. Los efectos adversos provocados por los agroquímicos han fomentado la investigación para el desarrollo de productos biológicos que ayuden a potenciar el crecimiento de las plantas. Algunos microorganismos, y las moléculas que estos producen, pueden mejorar las condiciones generales de salud de las plantas y a mantener y regenerar la fertilidad y productividad del suelo a su vez que estimulan el proceso de nutrición de las plantas. La ficocianina (CPC), proteína producida por las cianobacterias, es una fuente de nitrógeno y azufre que puede inducir bioestimulación en las plantas convirtiéndola en un potencial insumo agrícola. Para su preservación es adecuado encapsularla con un agente que la proteja de factores externos. El quitosano tiene propiedades de biocompatibilidad, baja toxicidad y actividad antimicrobiana. El objetivo de esta investigación es evaluar el efecto de la aplicación de quitosano, ficocianina y encapsulado de ficocianina/quitosano en el cultivo de lechuga. Los resultados demostraron que el quitosano al 0.1% incrementó el peso fresco de las plantas y el contenido de clorofila.
Palabras clave. bioestimulante, ficocianina, quitosano, encapsulación, lechuga

Abstract. The adverse effects caused by agrochemicals have encouraged research into the development of biological products that promote plant growth. Certain microorganisms and the molecules they produce can improve overall plant health, help maintain and restore soil fertility and productivity, and stimulate plant nutrient uptake. Phycocyanin (CPC), a protein produced by cyanobacteria, is a source of nitrogen and sulfur that may induce biostimulatory effects in plants, making it a potential agricultural input. To preserve its properties, encapsulation with a protective agent that shields it from external factors is a suitable approach. Chitosan exhibits biocompatibility, low toxicity, and antimicrobial activity. The objective of this study was to evaluate the effects of chitosan, phycocyanin, and phycocyanin/chitosan encapsulates on lettuce cultivation. The results demonstrated that 0.1% chitosan increased plant fresh weight and chlorophyll content.
Keywords: biostimulant, phycocyanin, chitosan, encapsulation, lettuce

Introducción

Los agroquímicos son un medio para lograr un mejor crecimiento en las plantas, además de inducir resistencia frente a diversos factores de estrés biótico y abiótico, mejorando el rendimiento. Sin embargo, su aplicación constante tiene efectos adversos; más del 90% de estos productos se lavan con el aire o a través del agua con la escorrentía hacia los suelos, lo que cuestiona la sostenibilidad de las prácticas agrícolas al generar un impacto negativo en el medio ambiente (Yu *et al*., 2021). Debido a esto, se ha incrementado la demanda de productos biológicos en la agricultura lo que ha fomentado la investigación sobre nuevas técnicas de formulación y, especialmente, la producción de productos biológicos encapsulados. De acuerdo con el Reglamento de la Unión Europea (2019), los bioestimulantes de plantas son "cualquier sustancia o microorganismo capaz de estimular el proceso de nutrición de las plantas independientemente de su contenido de nutrientes" (Arahou *et al*., 2023). Entre las ventajas de utilizar bioestimulantes destacan (i) utilización eficiente de los nutrientes, (ii) mejora la salud, estructura y fertilidad del suelo, (iii) mejora la tolerancia de las plantas al estrés biótico y abiótico, (iv) se estimula la síntesis de sustancias en las raíces y (v) se reduce el impacto ambiental (Ayub & Naqvi, 2026).

Las cianobacterias son una fuente importante de moléculas de interés. Su biomasa puede mejorar las condiciones generales de salud de las plantas por su capacidad para mantener y regenerar la fertilidad y productividad del suelo (Bello *et al*., 2021). Entre los estudios sobre el uso de extractos de cianobacterias con fines bioestimulantes destacan la mejora en el crecimiento de las plantas de maíz (*Zea mays* L.) debido a la activación de semillas con Spirulina en suelos contaminados con cadmio. Concluyeron que el efecto estimulante podría deberse a reguladores de crecimiento presente en los extractos de la cianobacteria como el etileno, la cinetina y el ácido giberélico (Seifikalhor *et al*., 2020). Con el fin de investigar las propiedades bioestimulantes de la biomasa hidrolizada de Spirulina sobre el crecimiento de lechuga, Mógor *et al*. (2018) encontraron que en concentraciones de 1- 9 g/L se mejoró el crecimiento y desarrollo vegetal. Además, las aplicaciones foliares del hidrolizado a reacción de 4 horas fue lo más efectivo para promover el crecimiento y aumentar el contenido de espermina en un 64% en las hojas de lechuga. Arahou *et al*. (2023) mencionan que el mecanismo mediante el cual los extractos de Spirulina mejoran la germinación no está completamente descrito y podría implicar un efecto sinérgico de varias moléculas.

La ficocianina (CPC), proteína hidrosoluble producida por las cianobacterias, tiene efectos antioxidantes, antiinflamatorios y potenciadores del sistema inmunológico. Por su intenso color azul, se ha utilizado en la industria alimentaria, cosmética y biomédica. De acuerdo con Decesaro *et al*. (2017) puede tener propiedades de biorremediación en el suelo y potencial como insumo agrícola.

Pocos estudios se han realizado con ficocianina en cultivos vegetales. Varia *et al*. (2022) evaluaron la adición de CPC (150

mg/L) en lechuga hidropónica. Observaron que las lechugas tratadas con la proteína tuvieron mejor longitud de hoja y diámetro del tallo. En semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) el empleo de CPC incrementó el peso fresco y la longitud de la plántula 80.77% y 50.79%, respectivamente, en comparación con el control (Metwally *et al*., 2022).

Los extractos de estos microorganismos suelen verse comprometidos durante su procesamiento y almacenamiento. Debido a ello, como posible solución a este problema está la microencapsulación. Este método implica encapsular el ingrediente activo dentro de una cubierta protectora. Con esto se ayuda a mejorar la estabilidad y eficacia del producto (Adristy & Handayani, 2026) .

La encapsulación es un proceso tecnológico muy utilizado en la industria farmacéutica, cosmética y alimentaria para mejorar la estabilidad durante el procesamiento y almacenamiento, aumentar la biodisponibilidad, controlar la liberación, mejorar la solubilidad o, en el caso de la industria alimentaria, enmascarar sabores desagradables. La selección de una metodología de encapsulación particular, materiales formadores de película y agentes encapsulantes se realiza según la aplicación específica y el rendimiento y la estabilidad deseados de los sistemas durante el procesamiento y almacenamiento (Faieta *et al*., 2020). El secado por aspersión se usa a menudo por su operación sencilla, alta velocidad y bajo costo. Los materiales de pared más comúnmente usados para el secado por atomización son a base de carbohidratos y proteínas (Pebriyanti *et al*., 2025). El proceso se puede describir como el bombeo de la solución o suspensión hacia el atomizador (fase I), donde se pulveriza en forma de niebla de gotas (spray) dentro de la cámara de secado (fase II), donde ocurre la evaporación del solvente. Esto describe el proceso de secado mediante aire caliente, transformando las gotas líquidas en partículas sólidas (fases III y IV), que se recolectan en el filtro ciclón u otro sistema de recolección de polvo (Serra Costa *et al*., 2015).

Existen diferentes materiales de recubrimiento, como maltodextrina, pectina, goma arábiga, aislados de proteína de suero y almidones modificados. Los materiales de recubrimiento tienen diferentes eficiencias de encapsulación y liberación de los compuestos activos. Además, estos determinan la estabilidad en almacenamiento y la digestibilidad (Dadi *et al*., 2019). El quitosano es un polímero natural e hidrofílico, derivado desacetilado de la quitina. Es muy utilizado para la producción de nanopartículas ya que tiene propiedades biocompatibles y biodegradables. Particularmente, en la agricultura su uso es interesante porque puede ser absorbido por las superficies de las plantas (por ejemplo, hojas y tallos), aumentando el tiempo de contacto entre las sustancias encerradas y los tejidos de la planta. Además, las nanopartículas de quitosano facilitan la transferencia a través de la membrana celular (Jiménez *et al*., 2023). Ayub & Naqvi (2026) refieren que además de los efectos positivos en el crecimiento de las plantas, el quitosano aumenta la producción de metabolitos secundarios funcionando como un potente elicitor contra la infestación de patógenos,

ofreciéndose como una alternativa sostenible a los pesticidas químicos.

La caracterización de los compuestos encapsulados permite determinar la efectividad del proceso empleado. Algunas de las principales técnicas para caracterizar son la microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR). La microscopía electrónica de barrido es un método avanzado de imagen que permite una evaluación detallada de la morfología de las micropartículas, incluyendo su tamaño, forma y distribución, ofreciendo información sobre la eficiencia y calidad del proceso de síntesis. El FTIR es una herramienta clave para estudiar la química superficial de las nanopartículas fabricadas. Tiene un papel crucial para entender cómo las biomoléculas contribuyen al complejo proceso de producción de nanopartículas durante la biofabricación (Defaei *et al*., 2025).

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es un vegetal de hoja, fuente rica en vitamina A, C, ácido fólico y potasio, que ayuda a fortalecer el sistema inmunológico y mantener la salud ósea. Sus hojas se suelen consumir frescas en ensaladas o en productos mínimamente procesados. Está en demanda todo el año y es relativamente fácil de cultivar, con un ciclo de crecimiento corto (Dasgan *et al*., 2023). El uso de bioestimulantes en lechuga aumenta el contenido de clorofila, la asimilación de carbono, la modulación del metabolismo vegetal y la actividad enzimática (Oliveira *et al*., 2025).

El objetivo de esta investigación fue caracterizar fisicoquímica y morfológicamente el encapsulado de ficocianina en quitosano (y los productos individuales) así como evaluar su efecto en el crecimiento de lechuga *Lactuca sativa* var. longifolia ‘Parris Island’.

Materiales y Métodos

Caracterización del encapsulado.

Para la evaluación de la morfología de la superficie se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM) como lo describen (İlter *et al*., 2022), con un equipo marca Zeiss modelo Evo | MA 25 (Oberkochen, Alemania. Las muestras se colocaron sobre soportes de aluminio utilizando cinta adhesiva de doble cara y se recubrieron con oro en una cámara de vacío con inyección de argón. Los grupos funcionales se determinaron por medio de espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) con un equipo marca Malvern (Malvern, Reino Unido) de acuerdo con lo establecido por (Iqbal & Hadiyanto, 2020). El tamaño de partícula se determinó como lo describen da Silva *et al*. (2019) con un Zetasizer Nano marca Malvern Instruments (Malvern, Reino Unido). La ficocianina y el quitosano se disolvieron en agua y el encapsulado se suspendió en etanol al 70%. Estos análisis se realizaron en el Centro de Biotecnología FEMSA del Tecnológico de Monterrey.

Evaluación del efecto bioestimulante en el crecimiento de lechugas.

Para evaluar el efecto del quitosano, ficocianina y producto encapsulado en lechuga variedad Parris Island se utilizó un diseño de bloques completamente al azar con 10 tratamientos, 3 bloques y 3

repeticiones (como se muestra en el cuadro 1).

Cuadro 1. Tratamientos para la evaluación del efecto de quitosano, ficocianina y encapsulado en el crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) variedad Parris Island.

Tratamiento	Ingrediente activo	Concentración
Control	-	-
Q01	Q	0.1%
Q05	Q	0.5%
Q09	Q	0.9%
F01	CPC	0.1%
F05	CPC	0.5%
F09	CPC	0.9%
E01	E	0.1%
E05	E	0.5%
E09	E	0.9%

Q: quitosano, CPC: ficocianina, E: encapsulado de ficocianina con quitosano

Las semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L. var. longifolia) 'Parris Island' se germinaron en charolas con 128 cavidades utilizando peat moss como sustrato. Después de 15 días de germinadas, se trasplantaron a macetas (9 cm de diámetro de boca y 6 cm de base; capacidad de 180 ml) con peat moss mezclado con el tratamiento a evaluar (Fig. 1).

Se regaron diariamente con solución Steiner al 10% durante los primeros 7 días. Posteriormente se regaron con solución al 25% durante 2 semanas y después con solución al 50% hasta su cosecha, al día 30 del trasplante. Se evaluaron: número de hojas, longitud del tallo, peso fresco y peso seco. La clorofila se determinó con un medidor portátil de clorofila SPAD (fabricante y modelo no especificados) bajo las siguientes condiciones de funcionamiento: rango de medición de 0.0-100 SPAD, área de medición de 2 mm x 2 mm, precisión de medición ±1.0 unidad SPAD (valor SPAD entre 0 y 50 a temperatura ambiente) y repetibilidad ±0.3 unidades SPAD (valor SPAD entre 0 y 50).



Fig 1. Diseño de bloques completamente al azar para el cultivo de lechuga *Lactuca sativa* L.

Resultados y Discusión

Caracterización del encapsulado.

La morfología de la superficie del quitosano (Fig. 2a) se muestra con pliegues o rugosidad a diferencia de la ficocianina (Fig. 2b) que es más lisa. El quitosano por sí solo es amorfo, no tiene estructura uniforme, su empaquetamiento tiene un relieve irregular con valles. Además, al entrar en la cámara de vacío para la preparación de la muestra,

pierde agua drásticamente provocando que sus cadenas poliméricas colapsen y se encojan, generando pliegues. En cambio, la ficocianina es una proteína globular que se pliega sobre si misma en forma esférica u ovoide creando bloques con superficies planas que se ven lisas. En el producto encapsulado (Fig. 3c) se observan también superficies lisas debido al proceso de secado. La ficocianina actúa como un relleno que evita que la corteza del quitosano se colapse drásticamente o se doble hacia adentro al perder agua, logrando mantener una periferia uniforme y estirada. De esta manera, se forma una matriz estable.

Se puede apreciar que el tamaño de las partículas de quitosano y ficocianina son superiores por si solas, en comparación con el producto encapsulado, demostrando la efectividad del proceso de encapsulamiento mediante secado por aspersión. El tamaño y la forma de las partículas encapsuladas es consistente con lo reportado por (Hadiyanto *et al*., 2019), que al liofilizar ficocianina con quitosano para la encapsulación obtuvieron tamaños de 2-4 µm y forma redondeada. Pebriyanti *et al*. (2025) explicaron que las variaciones en la estructura molecular y en las propiedades fisicoquímicas de los materiales encapsulantes, como la actividad superficial y el peso molecular, pueden afectar el tamaño de las partículas. Con maltodextrina y goma arábiga (50:50) obtuvieron encapsulados de 54.4 µm, que se redujo a 3.10 nm usando maltodextrina con alginato. Similar a la presente investigación, el estudio de İlter *et al*. (2022) produjo microcápsulas de ficocianina con estructura esférica con superficie con menos curvas y de tamaño heterogéneo, al encapsularla con maltodextrina y aislado de proteína de suero, mediante secado por aspersión a 168ºC Encapsulando ficocianina con maltodextrina y carragenina, mediante secado por aspersión probando tres temperaturas distintas, Purnamayati *et al*. (2018) obtuvieron resultados diferentes, ya que sus microcápsulas tuvieron forma irregular con apariencia agrietada, especialmente a 90ºC. Al encapsular con 130ºC la forma fue ligeramente más redondeada, demostrando que la temperatura de secado influye de manera significativa en la morfología de la superficie.

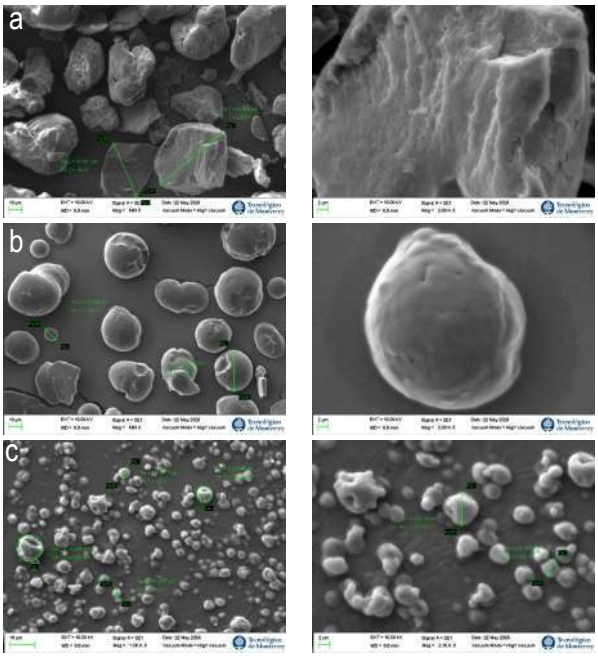


Fig. 2. Microscopía electrónica de barrido de a) quitosano magnificación 500x y 2000x; b) ficocianina magnificación 500x y 2000x y c) encapsulado de ficocianina/quitosano, magnificación 1000x y 2000x.

Los grupos funcionales determinados por espectroscopía de infrarrojo se muestran en la Fig. 3. En el quitosano (Fig. 3a) se identifica una banda ancha a los 3350 cm^{-1} de los grupos O-H y N-H que se sobreponen. Un pico a 1645 cm^{-1}, se debe al grupo carbonilo (C=O) perteneciente a

grupos amida I por acetamidas residuales de la desacetilación de la quitina. A 1576 cm^{-1} se aprecia un pico de enlace N-H (amidas II), esta deformación se debe al proceso de desacetilación de la quitina que convierte los grupos amida en aminas libres. Otro pico se observa a 1148 cm^{-1} debido a enlaces C-O-C.

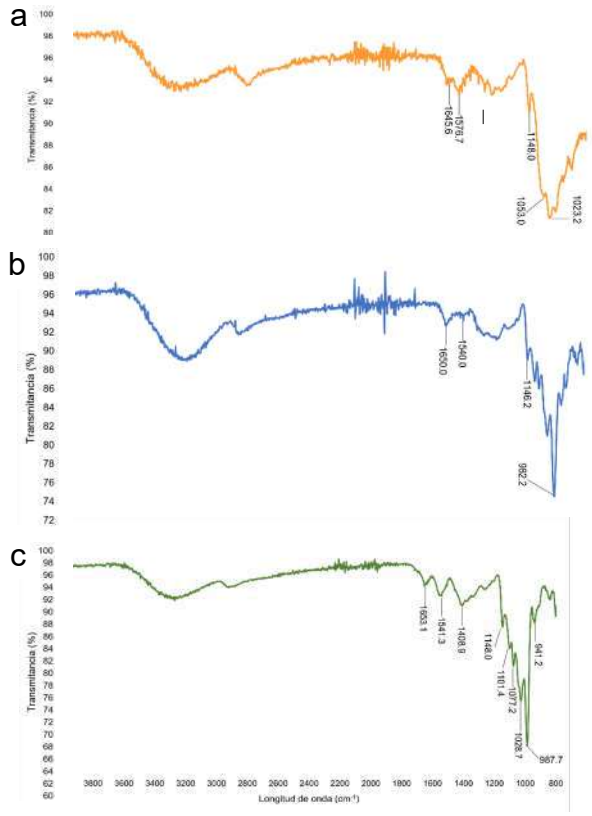


Fig. 3. Espectroscopía infrarroja del quitosano (a), ficocianina (b) y encapsulado (c).

En la ficocianina (Fig. 3b) se observan picos a 1650 cm^{-1} y 1540 cm^{-1}, correspondiente a grupos amida I y amida II, respectivamente. A 982.2 cm^{-1} se encuentra el pico más intenso, con una transmitancia de 72.45% que representa las vibraciones del esqueleto de la proteína y flexiones del anillo pirrólico del cromóforo comprobando que la muestra conserva el cromóforo unido a la proteína.

En el encapsulado (Fig. 3c) hay una banda ancha cerca de los 3290 cm^{-1}, que es mas notable que en el quitosano, evidenciando la superposición de los grupos O-H y N-H de ambos materiales. Los picos 1541cm^{-1} (amida II) y 1653 cm^{-1} (amida I) presentes en el encapsulado corresponden con los observados en la ficocianina (1540 y 1650) y el quitosano (1576 y 1645). Además, presenta el pico a 987.7 cm^{-1} que se aprecia también en la ficocianina, lo que comprueba que los dos materiales se unieron bien. Evaluando la encapsulación de ficocianina con quitosano y carragenina (por separado), Hadiyanto *et al*. (2019) tuvieron espectros similares a los obtenidos en la presente investigación para la ficocianina sola (picos a 1546.7 y 1652 cm^{-1}), mientras que el quitosano y el encapsulado de ambos un solo pico a 1650 cm^{-1}.

Evaluación del efecto bioestimulante en el crecimiento de lechuga.

Los resultados obtenidos del crecimiento de la lechuga se muestran en el cuadro 2.

En longitud de tallo y peso seco no se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos (p= 0.421 y p= 0.183, respectivamente).

El número de hojas (p= 0.000) fue superior en Q01 (18.11 ± 3.14), pero estadísticamente igual a Q05 (17.89 ± 3.26) y E01 (18.00 ± 2.92). Las bajas concentraciones de quitosano y encapsulado resultaron benéficas para el desarrollo de las hojas.

Cuadro 2. Crecimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) bajo diferentes concentraciones de quitosano, ficocianina y encapsulado.

Tratamiento	Número de hojas	Longitud del tallo	Peso fresco (mg)	Peso seco (mg)	Clorofila- SPAD
Control	14.33± 1.94^{ab}	6.33 ± 2.02	25.49 ± 9.34^{b}	7.08 ± 1.46	24.75 ± 2.12^{b}
Q1	18.11 ± 3.14^{a}	5.94 ± 1.57	36.86± 12.71^{a}	7.63 ± 0.77	30.69 ± 5.27^{a}
Q05	17.89± 3.26^{a}	6.61 ± 3.01	25.25 ± 7.00^{b}	7.29± 1.17	28.60 ± 2.65^{ab}
Q09	13.33 ± 4.18^{d}	8.17 ± 3.09	13.17 ± 8.44^{c}	7.19 ± 0.52	23.97 ± 2.01^{b}
F01	14.22 ± 2.95^{ab}	7.33 ± 2.98	13.06 ± 5.31^{c}	7.43 ± 0.59	25.50 ± 3.61^{b}
F05	14.67 ± 2.65^{ab}	7.94 ± 4.17	15.15 ± 4.26^{c}	7.27 ± 0.77	29.06 ± 4.01^{ab}
F09	15.44 ± 2.92^{ab}	7.44 ± 3.40	14.42 ± 4.61^{c}	7.07 ± 0.63	24.59 ± 3.93^{b}
E01	18.00 ± 2.92^{a}	6.06 ± 1.91	16.76±3.28^{bc}	7.73 ± 0.20	27.00 ± 3.74^{ab}
E05	13.22 ± 2.49^{d}	7.56 ± 3.22	15.86 ± 2.96^{c}	6.73 ± 0.97	25.88 ± 2.65^{ab}
E09	13.67 ± 2.40^{b}	6.56 ± 2.44	16.77± 2.32^{bc}	7.04± 1.19	26.57 ± 3.77^{ab}
P	0.000	0.421	0.000	0.183	0.001

Columnas con diferente letra indica diferencia significativa. Q= quitosano, F= ficocianina y E= encapsulado. Los números corresponden a la concentración empleada.

El peso fresco (p = 0.000) fue superior en Q01 (36.86 ± 12.71) y el valor más bajo en F01 (13.06 ± 5.31), estadísticamente similar a E05, F05, F09 y Q09. Adicionar 0.1% de quitosano resultó en un incremento de peso del 44.61% con respecto al control. Xu & Mou (2018) mencionan que el quitosano aplicado en el suelo incrementa el número de hojas, el peso de la planta y el contenido de clorofila en lechuga, efectos que se han observado también en tomate (*Solanum lycopersicum*).

La clorofila (p = 0.001) fue superior en Q01 (30.69 ± 3.11) e inferior en Q09 (23.97 ± 2.01), representando un incremento del 24%. De manera similar a la investigación de Xu & Mou (2018) , donde se probaron diferentes concentraciones de quitosano en el cultivo de lechuga, al 0.10% se incrementó la clorofila a 34.4. Sin embargo, probaron una concentración media de 0.30% que aumentó a 41.4 el contenido de clorofila. Esto demuestra que concentraciones bajas y medias de quitosano son beneficiosas para la producción de clorofila en lechuga. Ovalı & Ünlü (2024) tuvieron mayor contenido de clorofila (41.8) al realizar aspersión foliar con 300 ppm de quitosano disuelto en ácido acético.

Conclusiones

El quitosano por si solo demostró ser el compuesto con mayor efecto estimulante en lechugas. Aplicarlo en la menor concentración (0.1%) aumentó el peso de las plantas y la producción de clorofila.

Agradecimientos

Se agradece a la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León por permitir el uso de sus instalaciones. A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación. Al Tecnológico de

Monterrey por las facilidades para la realización de la caracterización de las muestras. A los doctores que integran el comité de tesis, por su valioso tiempo y apoyo.

Referencias Bibliográficas

Adristy, V. Z., & Handayani, N. A. (2026). Marine-based materials for probiotics microencapsulation: A review of applications in functional food. 080004. https://doi.org/10.1063/5.0313754

Arahou, F., Lijassi, I., Wahby, A., Rhazi, L., Arahou, M., & Wahby, I. (2023). Spirulina-Based Biostimulants for Sustainable Agriculture: Yield Improvement and Market Trends. In Bioenergy Research (Vol. 16, Number 3, pp. 1401–1416). Springer. https://doi.org/10.1007/s12155-022-10537-8

Ayub, F., & Naqvi, S. L. H. (2026). Plant biostimulants in sustainable agriculture: current understanding, physiological responses, field applications and future perspectives. Journal of Plant Nutrition, 1–24. https://doi.org/10.1080/01904167.2026.2747010

da Silva, S. C., Fernandes, I. P., Barros, L., Fernandes, Â., José Alves, M., Calhelha, R. C., Pereira, C., Barreira, J. C. M., Manrique, Y., Colla, E., Ferreira, I. C. F. R., & Filomena Barreiro, M. (2019). Spray-dried Spirulina platensis as an effective ingredient to improve yogurt formulations: Testing different encapsulating solutions. Journal of Functional Foods, 60. https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103427

Dadi, D. W., Emire, S. A., Hagos, A. D., & Eun, J. B. (2019). Effects of spray drying process parameters on the physical properties and digestibility of the microencapsulated product from Moringa stenopetala leaves extract. Cogent Food and Agriculture, 5(1). https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1690316

Dasgan, H. Y., Yilmaz, D., Zikaria, K., Ikiz, B., & Gruda, N. S. (2023). Enhancing the Yield, Quality and Antioxidant Content of Lettuce through Innovative and Eco-Friendly Biofertilizer Practices in Hydroponics. Horticulturae, 9(12). https://doi.org/10.3390/horticulturae9121274

Decesaro, A., Rampel, A., Machado, T. S., Thomé, A., Reddy, K., Margarites, A. C., & Colla, L. M. (2017). Bioremediation of Soil Contaminated with Diesel and Biodiesel Fuel Using Biostimulation with Microalgae Biomass. Journal of Environmental Engineering, 143(4). https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001165

Defaei, A., Shahrian, M., & Karimi, J. (2025). Eco-friendly synthesis of silver nanoparticles from filamentous cyanobacteria Arthrospira platensis phycocyanin and its antifungal and antibacterial activities. South African Journal of Chemical Engineering, 53, 495–499.

https://doi.org/10.1016/j.sajce.2025.06.011

Faieta, M., Corradini, M. G., Di Michele, A., Ludescher, R. D., & Pittia, P. (2020). Effect of Encapsulation Process on Technological Functionality and Stability of Spirulina Platensis Extract. Food Biophysics, 15(1), 50–63. https://doi.org/10.1007/s11483-019-09602-1

Hadiyanto, H., Christwardana, M., Suzery, M., Sutanto, H., Nilamsari, A. M., & Yunanda, A. (2019). Effects of carrageenan and chitosan as coating materials on the thermal degradation of microencapsulated phycocyanin from spirulina sp. International Journal of Food Engineering, 15(5–6). https://doi.org/10.1515/ijfe-2018-0290

İlter, I., Koç, M., Demirel, Z., Conk Dalay, M., & Kaymak Ertekin, F. (2022). Microencapsulation of phycocyanin by spray-drying method: Effect of process parameters and wall materials. Journal of Food Processing and Preservation, 46(4). https://doi.org/10.1111/jfpp.16434

Iqbal, M. N., & Hadiyanto, H. (2020). Experimental investigation of phycocyanin microencapsulation using maltodextrin as a coating material with spray drying method. AIP Conference Proceedings, 2197. https://doi.org/10.1063/1.5140953

Jiménez, A., Morales, S., Silva, P., Carrêlo, H., Gonçalves, A., Teixeira, G., Nunes, N., Gouveia, C., Alves, S., Borges, J., & Pinheiro de Carvalho, M. (2023). Encapsulation with Natural Polymers to Improve the Properties of Biostimulants in Agriculture. In Plants (Vol. 12, Number 1). MDPI. https://doi.org/10.3390/plants12010055

Metwally, R. A., Abdelhameed, R. E., Soliman, S. A., & Al-Badwy, A. H. (2022). Potential use of beneficial fungal microorganisms and C-phycocyanin extract for enhancing seed germination, seedling growth and biochemical traits of Solanum lycopersicum L. BMC Microbiology, 22(1). https://doi.org/10.1186/s12866-022-02509-x

Mógor, Á. F., Ördög, V., Lima, G. P. P., Molnár, Z., & Mógor, G. (2018). Biostimulant properties of cyanobacterial hydrolysate related to polyamines. Journal of Applied Phycology, 30(1), 453–460. https://doi.org/10.1007/s10811-017-1242-z

Oliveira, T. M. L. de, Pires, J. S. B., Oliveira, V. de S., Jeveaux Machado, A. J. C., Fernandes, A. A., Arantes, L. de O., & Dousseau-Arantes, S. (2025). Potential of the Use of Biostimulants in Lettuce Production. In Plants (Vol. 14, Number 15). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/plants14152416

Ovalı, G., & Ünlü, H. O. (2024). Effects of Chitosan Application on the Yield and Quality of Lettuce. BioResources, 19(1), 985–997. https://doi.org/10.15376/biores.19.1.985-997

Pebriyanti, P., Budhiyanti, S. A., & Ekantari, N. (2025). Response Surface Methodology for Optimizing the Concentration of Gum Arabic, Maltodextrin, and Whey Protein Isolate in Arthrospira platensis Phycocyanin Microcapsules. Jurnal Ilmiah Perikanan Dan Kelautan, 17(3), 558–576. https://doi.org/10.20473/jipk.v17i3.74555

Purnamayati, L., Dewi, E. N., & Kurniasih, R. A. (2018). Phycocyanin stability in microcapsules processed by spray drying method using different inlet temperature. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 116(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/116/1/012076

Seifikalhor, M., Hassani, S. B., & Aliniaeifard, S. (2020). Seed Priming by Cyanobacteria (Spirulina platensis) and Salep Gum Enhances Tolerance of Maize Plant Against Cadmium Toxicity. Journal of Plant Growth Regulation, 39(3), 1009–1021. https://doi.org/10.1007/s00344-019-10038-7

Serra Costa, S., Souza Machado, B. A., Regina Martin, A., Bagnara, F., Andre Ragadalli, S., & Costa Alves, A. R. (2015). Drying by spray drying in the food industry: Micro-encapsulation, process parameters and main carriers used. African Journal of Food Science, 9(9), 462–470. https://doi.org/10.5897/ajfs2015.1279

Varia, J., Kamaleson, C., & Lerer, L. (2022). Biostimulation with phycocyanin-rich Spirulina extract in hydroponic vertical farming. Scientia Horticulturae, 299. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111042

Xu, C., & Mou, B. (2018). Chitosan as soil amendment affects lettuce growth, photochemical efficiency, and gas exchange. HortTechnology, 28(4), 476–480. https://doi.org/10.21273/HORTTECH04032-18

Yu, J., Wang, D., Geetha, N., Khawar, K. M., Jogaiah, S., & Mujtaba, M. (2021). Current trends and challenges in the synthesis and applications of chitosan-based nanocomposites for plants: A review. In Carbohydrate Polymers (Vol. 261). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117904

Celulosa bacteriana como sustrato activo en la producción de plántulas de lechuga (*Lactuca sativa L.*).

Dante Daniel Pérez-Puente*; Julia Mariana Márquez-Reyes; Guillermo Cristian Guadalupe Martínez-Ávila; Romeo Rojas-Molina; Edgar Vladimir Gutiérrez-Castorena; Alejandro Luna-Maldonado.
Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 2566 1786. *Email: dante.perezpnt@uanl.edu.mx

Resumen. En la era moderna eficientizar las zonas de cultivos para tener mejores rendimientos y generar resistencia a condiciones adversas trae consigo una gran variedad de propuestas, pero también de factores para tener en cuenta, tales como las condiciones del suelo o sustrato. La Celulosa Bacteriana (CB) se presenta como un candidato para fungir como sustrato activo dadas sus propiedades fisicoquímicas, de capacidad de retención de agua y compuestos, su cristalinidad, pureza, así como su capacidad de inhibir compuestos oxidantes y algunos tipos de bacterias y hongos. Se evaluó la adición de CB (0, 5 y 10%) como sustrato activo en combinación de la fibra de coco (FC) para cultivar lechuga desde la germinación hasta plántulas. Tras 21 días, se obtuvo un porcentaje de germinación de 58.33, 91.67 y 77.08%. para los tratamientos con 0, 5 y 10% de CB respectivamente. El tratamiento con 5% de CB generó las plántulas con mayor longitud total promedio de 7.14±1.78 cm; longitud radicular de 2.47±1.41 cm y que presentan en promedio 4 hojas por planta. De igual manera el tratamiento con 5% de CB presentó una inhibición del 48.81±3.05% para ABTS, 27.27±1.29% para DPPH y con una concentración de 21.95±2.78 mmol Trolox/g para fenoles totales y 65.12±7.31 µg GAE/g para FRAP. La CB al 5% combinada con 95% de FC favoreció el crecimiento y desarrollo de plántulas de lechuga, así como la cuantificación mayor de compuestos antioxidante relacionados con ABTS y DPPH.
Palabras clave. Celulosa bacteriana, Sustratos activos, Germinación de plántulas

Abstract. In the modern era, optimizing crop areas to achieve higher yields and build resilience to adverse conditions has given rise to a wide variety of proposals, but also to factors that must be considered, such as soil or substrate conditions. Bacterial Cellulose (BC) is a promising candidate to serve as an active substrate due to its physicochemical properties, water and nutrient retention capacity, crystallinity, purity, and its ability to inhibit oxidizing compounds and certain types of bacteria and fungi. The addition of BC (0, 5, and 10%) as an active substrate in combination with coconut fiber (CF) was evaluated for growing lettuce from germination to the seedling stage. After 21 days, germination rates of 58.33%, 91.67%, and 77.08% were obtained for the treatments with 0%, 5%, and 10% CB, respectively. The treatment with 5% CB produced seedlings with the greatest average total length of 7.14 ± 1.78 cm; root length of 2.47 ± 1.41 cm; and an average of 4 leaves per plant. Similarly, the 5% CB treatment showed an inhibition of 48.81±3.05% for ABTS, 27.27±1.29% for DPPH, a concentration of 21.95±2.78 mmol Trolox/g for total phenols, and 65.12±7.31 µg GAE/g for FRAP. The 5% CB combined with 95% FC promoted the growth and development of lettuce seedlings, as well as higher levels of antioxidant compounds related to ABTS and DPPH.
Keywords: Bacteria cellulose, Active substrate, seedlings germination.

Introducción

El éxito en la producción de plántulas lo constituyen el sustrato o medio de crecimiento y la nutrición, que se aplique al cultivo y de la calidad de la plántula que se use. Las características fisicoquímicas de los sustratos son importantes para la producción de plántulas e inciden en el crecimiento y desarrollo de estas, es por eso que debe poseer buenas propiedades que posibiliten su uso (Lascano-Bello *et al.* 2021). En México se usa principalmente tierra de monte, turba (peat moss), productos de madera (corteza, aserrín, virutas), compost de materia orgánica o desechos de jardinería, polvo de coco, estiércol, paja, tepojal, tezontle, basalto, perlita, arena, vermiculita, y piedra pómez.
La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una hortaliza de ciclo corto, sensible al estrés térmico y a las variaciones de humedad, las condiciones óptimas de cultivo son de 15-22°C, buena iluminación, pH de entre 6 y 7, agua disponible, sin saturación y humedad uniforme. En México, de acuerdo con el Panorama Agroalimentario 2018-2024 de la SIAP, se produjeron alrededor de 553 mil toneladas de lechuga, teniendo como principales estados productores a Guanajuato, Zacatecas y Puebla. Además, la variedad “romana” es la que se cultiva en mayoría, teniendo una producción de 468,763 toneladas para el año 2021 de acuerdo con datos de la Secretaría de Agricultura.

La CB posee características que la convierten en un buen candidato para servir como un sustrato activo para la producción de plantas dado que su estructura química se crea una red fibrosa de celulosa que contiene compuestos que fueron agregados durante su producción, derivado de los sustratos utilizados, tales como compuestos antioxidantes, antimicrobianos, etc. Y, además, la CB tiene disponibles sitios de agregación en forma de puentes de hidrogeno donde puede captar compuestos orgánicos y/o minerales y, en medida de su biodegradación estos compuestos pueden estar disponibles para la nutrición de las plantas.

Ngo *et al*. (2024), las nanofibras de celulosa (CNF) presentan una interacción directa con el agua y las partículas del suelo. Debido a sus grupos moleculares hidrofílicos y a su estructura tridimensional, las CNF tienen una elevada capacidad para absorber y almacenar agua. Cuando se incorporaron al suelo, parte de las fibras y del agua absorbida ocuparon los poros, pero la capacidad de almacenamiento de la red tridimensional de las CNF compensó esta reducción del agua retenida en los poros naturales. Por ello, la incorporación de la CB como sustrato activo también puede reducir los tiempos de riego y con ello, la cantidad de agua utilizada.

El objetivo del presente es estudiar el uso de la celulosa bacteriana (CB) como sustrato activo en combinación con fibra de coco (FC) para la producción de plántulas de lechuga de la variedad *Lactuca sativa* L longifoli.

Materiales y Métodos

Unidad experimental

Se utilizaron semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) var. longifoli que fueron adquiridas con el distribuidor Hydro Environment.

Se utilizaron charolas de germinación de 72 cavidades, utilizando una semilla por cavidad, y 48 cavidades para cada tratamiento, teniendo tres tratamientos: 100% de FC, 5% de CB con 95% de FC y 10% de CB con 90% de FC (Los cuales se representan en los resultados como T0, T5 y T10 respectivamente) asistido por el LLM (Large Lenguaje Model) “Watson Box” una subunidad diseñada por el MC Pedro Camarena, para automatizar el fotoperiodo de 10h con un riego de aproximadamente 2L con boquillas de nebulización de 0.2mm cada 4h para mantener la humedad relativa por encima del 70%.

La distribución de los tratamientos está representada en la Ilustración 1 donde se puede ver que se evitó utilizar las cavidades que conforman el perímetro exterior, esto debido a que el sistema de riego no es uniforme para toda la charola y los extremos/esquinas no tienen la misma cantidad de agua por riego que el resto de la charola.



Ilustración 1. Distribución de los tratamientos en las charolas de germinación, cada tratamiento corresponde a 48 cavidades.

La Ilustración 2 muestra la CB cosechada a los 21 días, la cual fue generada por con consorcio microbiano proveniente de una fermentación de kombucha, utilizando como sustrato de fermentación residuos de tallo de moringa, orujo de uva y dextrosa, mezclada con la FC sin ningún tratamiento previo.



Ilustración 2. Celulosa bacteriana triturada con agua sobre fibra de coco previo a su mezcla. La charola color naranja corresponde a T5, la morada a T10.

Lugar de Trabajo

El estudio fue realizado en el laboratorio de Biotecnología Microbiana de la Facultad de Agronomía de la UANL.

Porcentaje de germinación

El porcentaje de germinación se determinó contando las semillas germinadas en un periodo de 21 días comparado contra el total de semillas sembradas.

Medición de peso fresco y seco

Tras 21 días, se pesaron las plántulas de lechuga para cada tratamiento (peso fresco) posteriormente se llevaron a una estufa por un lapso de 24h con una temperatura de 50°C y se registró el peso seco para cada tratamiento.

Todas las mediciones fueron analizadas mediante un ANOVA para determinar si

existía diferencia estadística entre tratamientos y se realizó una comparación de medias de Tukey.

Medición de plántulas

Longitud total y radicular se midieron mediante el uso de un vernier. Para tener el número de hojas se contó la cantidad de hojas verdaderas que tenían las plántulas.

La medición del área foliar se llevó a cabo con la herramienta ImageJ, donde se procesaron fotografías de las plantas (n=3). Todas las mediciones fueron analizadas mediante un ANOVA para determinar si existía diferencia estadística entre tratamientos y se realizó una comparación de medias de Tukey.

Medición de Clorofila

La medición se realizó con el uso de un equipo MSE 0.0-99.9 SPAD 0-60°C Se tomaron 3 mediciones por plántula.

Medición de pH y conductividad eléctrica

Con un potenciómetro con electrodo de pH y otro para conductividad eléctrica, se midió por triplicado el lixiviado del sustrato conforme con la NOM-021-RECNAT-2000 suspendiendo 5g del sustrato en 10 mL de agua destilada (relación 1:2).

Todas las mediciones fueron analizadas mediante un ANOVA para determinar si existía diferencia estadística entre tratamientos y se realizó una comparación de medias de Tukey.

Actividad antioxidante

Para realizar las pruebas antioxidantes se preparó un macerado alcohólico con 0.05g de muestra triturada (plántula completa) en 10 mL de etanol. Se realizaron ensayos por triplicado de ABTS* y DPPH * donde se evaluó el porcentaje de inhibición (Castaldi *et al.* 2025), utilizando la siguiente ecuación:

$$\%Inhibición = \frac{(AInicial - Afinal)}{AInicial}\ x100$$

Donde A es absorbancia (ABTS* a 490nm; DPPH* a 517nm)

La prueba de FRAP se realizó por triplicado conforme a la metodología de Hernandez-Rodriguez (2022). El ensayo de fenoles totales se realizó por triplicado conforme a la prueba de Folin Ciocalteau, (Castaldi *et al.* 2025). Todas las mediciones fueron analizadas mediante un ANOVA para determinar si existía diferencia estadística entre tratamientos y se realizó una comparación de medias de Tukey.

Resultados y Discusión

Los resultados de la prueba de germinación, descritos en el cuadro 1, muestran como el T5 tuvo un mayor % de germinación, teniendo hasta un 91.67%, seguido de T10 con 77.08% y por último el tratamiento control, teniendo un 58.33%.

En cuanto a los pesos frescos por plántula, existe una diferencia significativa, teniendo como el tratamiento con mayor peso fresco fue T5.

El peso total y el porcentaje de germinación pueden estar relacionados con la adición de la CB en el medio ya que la combinación con la fibra de coco formó una matriz que ayudaba a la retención de agua, lo cual mantenía con humedad elevada por mayor tiempo comparado con el medio control.

Farghly *et al*. (2025) realizaron pruebas de germinación en lechugas con compostas de 4 residuos agroindustriales (cacahuate, palma, sorgo y plátano). Entre los resultados, se destaca que el tratamiento con mejores resultados fue el de compost

de cacahuate, teniendo una longitud radicular de hasta 10cm, un tallo de hasta 6cm y plantas con hasta 6 hojas tras 21 días de cultivo.

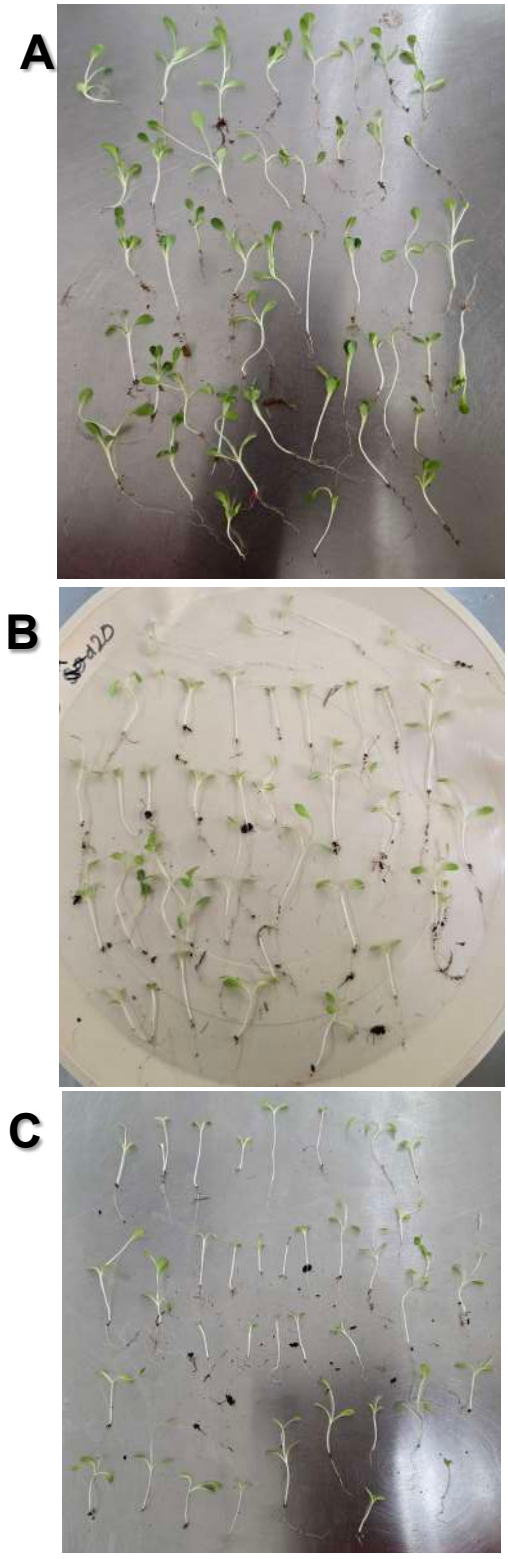


Ilustración 3. Plántulas cosechadas tras 21 días de germinación donde A: T0, B: T5 y C: T10

Cuadro 1. Mediciones de peso fresco, peso seco, % de germinación y peso fresco por plántula para tratamientos de lechuga (*Lactuca sativa L.)* con 0, 5 y 10% de CB como sustrato después de 21 días.

Muestra	Peso Fresco (g)	Peso Seco(g)	% de Germinación	Peso inicial por plántula (g/plántula)
T0	19.6c	0.053b	58.33c	0.7b
T5	38.8a	0.089a	91.67a	0.88a
T10	22.3c	0.059b	77.08b	0.6b

Letras diferentes sobre la misma columna indican diferencia estadística entre tratamientos.

Los tratamientos con CB mostraron una mayor longitud radicular, con 7.14±1.78 cm para T5 y 6.95±2.13 cm para T10, seguido del control con 6.36±1.61cm. Este patrón se repite para el número de hojas y su área foliar (Ilustración 3). El tratamiento T5 destacó por tener hasta 4 hojas por planta en promedio y un área foliar de 2.64±0.32cm^2

La CB contiene compuestos que pueden favorecer al desarrollo de las plántulas como lo son los ácidos orgánicos como el acético, tartárico y málico (estos dos últimos provenientes del orujo de uva; Seregin & Kozhevnikova, 2024) los cuales favorecen la movilización de algunos nutrientes, como fósforo, hierro y zinc; además, la CB contiene micronutrientes como Ca, Mg K, los cuales pueden estar presentes en los tratamientos T5 y T10, pues presentan una mayor longitud, y el T5 destaca en su número de hojas y área foliar (Cuadro 2). Estos aportes nutrimentales son adquiridos durante la generación de la CB en el fermentado a base de residuos de tallo de moringa y orujo de uva.

Cuadro 2. Mediciones de longitud total, radial, número de hojas y área foliar para tratamientos de lechuga (*Lactuca sativa L.)* con 0, 5 y 10% de CB como sustrato después de 21 días.

Muestra	Longitud total (cm)	Longitud Radicular (cm)	Número de hojas	Área foliar (cm^2)
T0	6.36±1.61b	1.78±1.36b	3.2±0.96b	2.12±0.51a
T5	7.14±1.78ª	2.47±1.41ª	3.63±0.59a	2.64±0.32a
T10	6.95±2.13a	2.09±1.25ª	2.95±0.66c	2.44±0.46a

Letras diferentes sobre la misma columna indican diferencia estadística entre tratamientos.

En cuanto a la medición de clorofila, el T10 destaca por presentar una mayor concentración de clorofila, seguido de T0 y T5 (Cuadro 3). La producción de clorofila está directamente relacionada a los procesos de fotosíntesis que llevan las plantas, por lo que, la disponibilidad de luz, agua y nutrientes como N, Mg y Fe son quienes determinan si hay una mayor o menor concentración de clorofila (Zahra *et al*. 2023). En el caso del T10 se puede atribuir a la capacidad de retención que genera el medio con la celulosa añadida y esto genera una mayor transferencia y transporte de nutrientes. En el caso del tratamiento T5 se puede observar que hay una menor concentración de clorofila en el área foliar, pero esto también puede deberse a la misma expansión foliar, puesto a una mayor área, así como la presencia de más hojas verdaderas.

En cuanto al pH y la conductividad del sustrato combinado (Cuadro 3), podemos ver como la FC ayuda a amortiguar el pH bajo que tiene la CB (2.2 a 2.5 al inicio de la etapa experimental). Sin embargo, la interacción de la CB con la FC provoca un aumento en la conductividad, esto es debido a que la FC contiene sales como sodio y potasio (Subran, *et al*. 2026), y es por ello que se requiere un lavado previo para retirar la mayor cantidad de sales posibles del sustrato. Se sugiere que la ausencia de un lavado previo en la FC pudo liberar sales las cuales se acumularon en la CB generando un aumento de la conductividad y que propició un medio más salino, pero debido a la capacidad de retención de la CB, se sugiere que estas sales fueron liberadas paulatinamente al medio.

Adhikari *et al*. (2024) realizaron estudios en lechuga romana con tratamientos salinos de $CaCl_2$ y KNO_3 como método de acondicionamiento para mitigar el estrés salino, y obtuvieron resultados de incremento de la biomasa fresca de un 25 y 36% al incrementar las concentraciones de sales.

Cuadro 3. Mediciones de clorofila, pH del sustrato y conductividad eléctrica para tratamientos de lechuga (*Lactuca sativa* L.) con 0, 5 y 10% de CB como sustrato después de 21 días.

Muestra	Clorofila (SPAD)	pH sustrato	Conductividad (ds)
T0	21.73±1.57ab	6.5±0.09c	53.5±87.8b
T5	19.7±1.3b	7.19±0.08 b	0.57±0.15
T10	24.6±0.88a	7.55±0.05 a	128.43±10.83a

Letras diferentes sobre la misma columna indican diferencia estadística entre tratamientos.

Los resultados de las pruebas antioxidantes se muestran en el Cuadro 4. Las plántulas con CB añadida dieron una mayor respuesta antioxidante, teniendo, 48.81±3.05 y 43.18±2% para ABTS, 27.27±1.29 y 22.74±1.47% para DPPH, y

65.12±7.31 y 72.09±7.23 µg GAE/g para FRAP para los tratamientos T5 y T10 respectivamente, en cambio, los compuestos fenólicos son estadísticamente similares en los 3 tratamientos.

Shin *et al*. (2021) evaluaron la capacidad antioxidante por FRAP y ABTS de plántulas de lechuga bajo estrés hídrico progresivo tras 8 días después de germinación. Los resultados mostraron una tendencia decreciente en ambas mediciones conforme aumentó la duración del déficit de agua, teniendo hasta 90umol Trolox/g en FRAP, para en ABTS alcanzó hasta 150 umol Trolox/g, el contenido de fenoles totales disminuyó significativamente al octavo día de estrés, con 15 mg CE/g. Los autores sugieren que la reducción de determinados compuestos antioxidantes puede relacionarse con una menor capacidad de neutralización de radicales y reducción química en plántulas expuestas a estrés hídrico prolongado.

Cuadro 4. Mediciones de actividad antioxidante por 4 métodos en extracto alcohólico para tratamientos de lechuga (*Lactuca sativa L*.) con 0, 5 y 10% de CB como sustrato después de 21 días.

Muestra	ABTS (% Inhibición)	DPPH (% Inhibición)	Fenoles (mmol Trolox/g)	FRAP (µg GAE/g)
T0	24.12±2.26^{a}	12.16±0.76^{a}	29.75±4.84^{a}	34.8±3.27b
T5	48.81±3.05^{b}	27.27±1.29^{c}	21.95±2.78^{a}	65.1±7.73^{a}
T10	43.18±2.00^{b}	22.74±1.47^{b}	29.89±3.16^{a}	72.1±7.21^{a}

Letras diferentes sobre la misma columna indican diferencia estadística entre tratamientos.

Conclusiones

La celulosa bacteriana al 5% en combinación con fibra de coco (95%) se puede considerar como un buen candidato de sustrato activo para la producción de lechuga, puesto que este tratamiento produjo plántulas con una mayor longitud total y radicular, tienen una mayor cantidad de hojas en promedio y mayor área foliar. Además, presenta diferencia estadística contra los tratamientos control en capacidad antioxidante por DPPH, ABTS y FRAP.

Se recomienda seguir caracterizando la CB como sustrato activo considerando las interacciones con los distintos tipos de sustratos aplicables en agricultura, sus tamaños de partícula y compuestos añadidos o inherentes al sustrato, así como tipos de cultivos.

Agradecimientos

Primero que nada, agradecer a posgrado de la FA UANL por la oportunidad de continuar mi formación educativa.
A mis asesores de tesis por todo el apoyo brindado, por la confianza y la motivación para lograr mis objetivos.
A la SECITHI por el apoyo económico otorgado para poder continuar en forma plena el posgrado.

Referencias Bibliográficas

Adhikari, B. Omolayo J. Olorunwa, Horgan, T, Wilson, T. Barickman, C. Li, T y Bheemanahalli, R. 2024. Seed priming attenuates the impact of salt stress and enhances lettuce yields, Journal of Agriculture and Food Research, Volume 15(100947).

Castaldi, S., Lorenz, C., Vitale, E., Santorufo, L., Isticato, R., & Arena, C. (2025). Potentialities of Technosol-isolated PGPB

consortium in promoting plant growth in lettuce seedlings. Plant and Soil, 507, 475–495.

Farghly, K. A., Ahmed, M. M. M., Eissa, M. A., Abdalla, R. M., & Gomah, H. H. (2025). Can compost be an alternative to germination media for growing lettuce seedlings in nurseries? Assiut Journal of Agricultural Sciences, 56(3), 267–282.

Hernandez-Rodriguez, J. 2022. Producción y caracterización de películas bioactivas de Celulosa microbiana en un sustrato de moringa (moringa oleífera) y Recubrimientas de mucílago de linaza (Linum usitatissimum). Tesis. Universidad Autónoma de Nuevo León.

Lazcano-Bello, María Isabel, Sandoval-Castro, Engelberto, Tornero-Campante, Mario Alberto, Hernández-Hernández, Brenda Nataly, Ocampo-Fletes, Ignacio, & Díaz-Ruíz, Ramón. (2021). Evaluación de sustratos, solución nutritiva y enraizador en producción de plántulas de jitomate. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *12*(1), 61-76.

Seregin, I. V., & Kozhevnikova, A. D. (2024). The role of low-molecular-weight organic acids in metal homeostasis in plants. International Journal of Molecular Sciences, 25(17), 9542.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2025. Panorama Agroalimentario 2018-2024. Gobierno de México.

Shin, Y. K., Bhandari, S. R., Jo, J. S., Song, J. W., & Lee, J. G. (2021). Effect of Drought Stress on Chlorophyll Fluorescence Parameters, Phytochemical Contents, and Antioxidant Activities in Lettuce Seedlings. Horticulturae, 7(8), 238.

Subran, U. Reghuvaran, A. Devipriya, S. Koyyappurath, S.2026. UV-C assisted reduction of electrical conductivity in coir pith: Influence of moisture content and structural transformations, Bioresource Technology Reports, Volume 3: 102653. compounds in *Escherichia coli*. Nature Biotechnology, 14(2), 620-623.

Zahra, N., *et al*. (2023). Plant photosynthetic responses under drought stress: Effects and management. Journal of Agronomy and Crop Science.

Zhang, L. Huang, Tao. Zhang, Q. Wei S. Contreras, V. Peng, J. Song, B. Li, Y. Yang, Q. y Yang, X. 2024. Plant factory technology as a powerful tool for improving vegetable quality: lettuce as an application example. Vegetable Research 4, e107.

Evaluación de la virulencia de *Metarhizium anisopliae* Metchnikoff mediante la determinación de la CL_{50} y TL_{50}

Daniel Moreno-Arredondo[1*]; Adriana Gutiérrez-Díez[1]; Orquídea Pérez-González[2]; Reyna Ivonne Torres-Acosta[3]; Emilio Olivares-Sáenz[1]; Víctor E. Aguirre-Arzola[1].
[1]Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Agronomía. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda El Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. CP. 66050.
[2]Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Biológicas. Av. Pedro de Alba S/N Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. CP. 66450.
[3]Universidad Autónoma de Tamaulipas. Unidad Académica Multidisciplinaria Mante. Blvd. Enrique Cárdenas González No. 1201 Pte. Mante, Tamaulipas. México. CP. 89845.
*Email: daniel.morenoar@uanl.edu.mx

Resumen. La citricultura es una actividad de importancia económica en México, una de las principales amenazas del cultivo es el Huanglongbing (HLB), enfermedad transmitida por *Diaphorina citri Kuwayama*. Los hongos entomopatógenos destacan entre las alternativas de control biológico de este vector. El objetivo de esta etapa de investigación fue evaluar la virulencia de la cepa CALinC1 de *Metarhizium anisopliae* Metchnikoff sobre adultos de *D. citri* mediante la determinación de la concentración letal media (CL_{50} y CL_{90}) y del tiempo letal medio (TL_{50}). Fueron evaluadas cinco concentraciones de conidios: $1x10^4$, $1x10^5$, $1x10^6$, $1x10^7$ y $1x10^8$ conidios/mL, y un tratamiento control. Cada tratamiento se estableció con tres repeticiones de 20 insectos, la mortalidad acumulada se registró diariamente durante un periodo de siete días. Se encontró significancia entre las concentraciones, siendo las mejores $1x10^7$ y $1x10^8$. La CL_{50} estimada al séptimo día fue de 1.35×10^4 con una CL_{90} conidios/mL. La TL_{50} disminuyó de 5.83 en la menor concentración, a 3.63 días en la mayor concentración. Los resultados muestran una respuesta relacionada con la concentración y el tiempo de evaluación lo cual respalda continuar estudiando esta cepa como agente potencial de control biológico de *D. citri*.
Palabras clave. Control biológico, mortalidad, HLB, concentración letal media.

Abstract. Citrus cultivation is an economically important activity in Mexico; one of its primary threats is Huanglongbing (HLB), a disease transmitted by *Diaphorina citri* Kuwayama. Entomopathogenic fungi stand out as a biological control option for this vector. The objective of this phase of the research was to evaluate the virulence of the *Metarhizium anisopliae* Metchnikoff strain CALinC1 against adult *D. citri* by determining the median lethal concentration (LC_{50} and LC_{90}) and the median lethal time (LT_{50}). Five conidial concentrations 1×10^4, 1×10^5, 1×10^6, 1×10^7, and 1×10^8 conidia/mL—were evaluated, alongside a control treatment. Each treatment consisted of three replicates of 20 insects, and cumulative mortality was recorded daily over a seven-day period. Significant differences were detected among the concentrations evaluated, with $1x10^7$ and $1x10^8$ conidia/mL being the most effective treatments. The estimated LC_{50} at day seven was 1.35×10^4 conidia/mL. The LT_{50} decreased from 5.83 days at the lowest concentration to 3.63 days at the highest concentration. The results demonstrate a response dependent on both concentration and duration of exposure, supporting further study of this strain as a potential biological control agent for *D. citri*.
Keywords: Biological control, mortality, HLB, median lethal concentration.

Introducción

La citricultura representa una de las actividades frutícolas de mayor importancia económica en México, destacando la producción de naranja, limón, mandarina y toronja. En Nuevo León, esta actividad se concentra principalmente en los municipios de Montemorelos, General Terán, Cadereyta Jiménez, Linares, Hualahuises, Allende y Los Ramones, donde constituye una fuente de ingresos y empleo para la población rural. La producción de cítricos enfrenta diversas limitaciones fitosanitarias ocasionadas por plagas y enfermedades, entre las que destaca el Huanglongbing (HLB) también conocido como enfermedad del dragón amarillo. Esta enfermedad se encuentra asociada principalmente con la bacteria *Candidatus* Liberibacter asiaticus, la cual coloniza el floema de las plantas y ocasiona alteraciones en el transporte de nutrientes, moteado asimétrico de las hojas, deformación de frutos, reducción del rendimiento y deterioro progresivo de los árboles (Hall *et al*., 2013; Cortez-Madrigal, 2024).

La dispersión de la bacteria asociada con el HLB ocurre mediante insectos vectores, entre los que destaca *Diaphorina citri* Kuwayama (Hemiptera: Liviidae), conocido como psílido asiático de los cítricos. Este insecto presenta un desarrollo hemimetábolo que comprende las etapas de huevo, cinco estadios ninfales y adulto. Tanto ninfas como adultos producen daño al alimentarse de brotes tiernos ocasionando daños por la extracción de savia y alteraciones en el desarrollo vegetativo, así como por su capacidad de adquirir y transmitir la bacteria. Debido a que no existe una estrategia curativa efectiva para los árboles afectados por esta enfermedad, el manejo de las poblaciones de *D. citri* constituye una de las principales medidas utilizadas para reducir su dispersión (Hall *et al*., 2013; Cortez-Madrigal, 2024).

El manejo de este vector se lleva a cabo a través de estrategias de control cultural, químico y biológico. A pesar de que el control químico ha sido una de las estrategias más utilizadas para reducir sus poblaciones, las aplicaciones frecuentes de insecticidas favorecen el desarrollo de resistencia y afecta a sus enemigos naturales presentes en las huertas (Cortez-Mondaca *et al*., 2025). Por esta razón, el control biológico representa una alternativa que ayuda a disminuir la dependencia de los insecticidas. Entre los organismos utilizados para este propósito se encuentran depredadores, parasitoides y microorganismos entomopatógenos, particularmente hongos capaces de ocasionar enfermedades en los insectos. La conservación y aprovechamiento de los enemigos naturales de *D. citri*, forma parte de la estrategia integral para el manejo del vector y del HLB (Cortez-Madrigal, 2024).

Los hongos entomopatógenos son microorganismos con capacidad de infectar y ocasionar la muerte de diferentes especies de insectos. Los principales géneros de importancia agrícola son *Beauveria*, *Metarhizium*, *Cordyceps*, *Hirsutella* y *Akanthomyces. Metarhizium anisopliae* destaca por su actividad entomopatógena y su capacidad para infectar diferentes insectos de importancia agrícola (Bamisile *et al*., 2021).

Numerosos estudios han investigado el potencial de los hongos entomopatógenos como agentes de control biológico de *D. citri*. Hussain *et al*. (2018) estudiaron la susceptibilidad de adultos de *D. citri* portadores y no portadores de *Candidatus Liberibacter asiaticus*, a hongos entomopatógenos bajo diferentes temperaturas. Corallo *et al*. (2021) evaluaron el potencial de *Beauveria bassiana* y *Metarhizium anisopliae* para el control de *D. citri*, incluyendo sus posibles efectos sobre enemigos naturales. Chen *et al*. (2025) evaluaron la actividad de *Metarhizium anisopliae* contra adultos de *D. citri*, así como su combinación con aceite vegetal para su aspersión. Estos antecedentes demuestran la importancia de evaluar la relación entre la concentración de conidios y el tiempo necesario para ocasionar mortalidad, debido a que ambos factores intervienen en la eficacia de los agentes de control microbiano.

En México se han realizado diversos estudios enfocados en la identificación y evaluación de hongos entomopatógenos para el control biológico de *D. citri*. Gandarilla-Pacheco *et al*. (2013a) evaluaron la patogenicidad de 16 aislados nativos y tres cepas de *Beauveria* sp, *Isaria* sp y *Metarhizium* sp, sobre ninfas del segundo al quinto estadio, permitiendo identificar diferencias en la mortalidad ocasionada por los hongos. En otros trabajos, Gandarilla-Pacheco *et al*. (2013b) evaluaron aislados de hongos entomopatógenos procedentes de regiones citrícolas de México sobre adultos de *D. citri* en donde compararon diferentes métodos de inoculación. Los resultados permitieron identificar aislados con actividad patógena y evidenciaron que el procedimiento utilizado para establecer el contacto entre los conidios y los insectos puede influir en la mortalidad obtenida.

Berlanga-Padilla *et al*. (2018) identificaron 30 cepas de hongos entre las que se encontraron *Hirsutella citriformis*, *Isaria javanica*, *Beauveria bassiana* y *Simplicillium lanosoniveum,* en huertas comerciales de cítricos en Colima.

En el noreste de México, Casique-Valdés *et al*. (2024) identificaron a *Hirsutella citriformis*, *Cordyceps javanica*, *Beauveria* cf. *bassiana* y *Akanthomyces* cf. *lecanii* asociadas a poblaciones de *D. citri* en la planicie costera del Golfo de México. Landa-Cadena *et al*. (2025) identificaron hongos entomopatógenos asociados con *D. citri* en cultivos de limón persa de Veracruz, confirmando la presencia de diferentes especies de hongos con potencial de control biológico en las regiones citrícolas de México.

La evaluación de la virulencia de los hongos entomopatógenos generalmente se realiza mediante bioensayos en los que se registra la mortalidad de los insectos expuestos a diferentes concentraciones de conidios. Aunque el porcentaje de mortalidad permite identificar tratamientos con actividad patógena, este indicador no describe completamente la relación entre la cantidad de conidios aplicada y el tiempo necesario para producir un efecto letal. Para complementar esta información pueden estimarse parámetros como la concentración letal media (CL_{50}), definida como la concentración que produce una mortalidad estimada del 50 % de la

población experimental en un periodo establecido, y el tiempo letal medio (TL_{50}), correspondiente al tiempo estimado necesario para alcanzar ese porcentaje de mortalidad a una concentración determinada. Estos parámetros permiten caracterizar cuantitativamente la virulencia y analizar la respuesta del insecto considerando tanto la concentración como el tiempo de exposición (Chen *et al*., 2025; Feng *et al*., 2026).

En evaluaciones previas realizadas con hongos entomopatógenos aislados de huertas de cítricos de Nuevo León, la cepa CALinC1 de *Metarhizium anisopliae* presentó una elevada mortalidad de adultos de *D. citri* bajo condiciones de laboratorio, por lo que fue seleccionada para continuar con la evaluación de virulencia. Por lo que el objetivo de esta fase de investigación fue evaluar la virulencia de la cepa CALinC1 de *Metarhizium anisopliae* sobre adultos de *Diaphorina citri*, mediante la estimación de la concentración letal media (CL_{50}) y el tiempo letal medio (TL_{50}), con la finalidad de caracterizar la relación entre la concentración de conidios, el tiempo de exposición y la mortalidad del insecto.

Materiales y Métodos

El bioensayo se realizó en el Laboratorio de Entomología y Fitopatología de la Facultad de Agronomía. Los ejemplares de *Diaphorina citri* fueron colectados de la cría establecida sobre *Murraya paniculata* y Citrus x limón en un invernadero experimental. La cepa CALinC1 de *Metarhizium anisopliae* fue previamente identificada mediante caracterización morfológica y molecular. Para la producción de conidios la cepa fue establecida en medio PDAY (papa-dextrosa-agar-levadura) al 1 %, durante 10 días. Al desarrollo de conidios, fueron colectados en 10 mL de agua destilada estéril raspando la superficie del medio con una espátula esterilizada. Esta suspensión de conidios fue inoculada en 50 g de arroz esterilizado, el cual se dejó en incubación en oscuridad a temperatura ambiente hasta el desarrollo de conidios (15 días aproximadamente). Para la preparación de la suspensión de conidios a diferentes concentraciones, se preparó una suspensión stock a partir de los conidios obtenido por enjuague del arroz inoculado, colocando 1 g de este en 9 mL de agua destilada estéril con Tween 20 0.05 % en un tubo para centrífuga de 50 mL; después de agitación en vórtex, se determinó la concentración de conidios mediante cámara de Neubauer. A partir esta suspensión se prepararon las suspensiones a concentraciones de $1x10^4$, $1x10^5$, $1x10^6$, $1x10^7$, y $1x10^8$ conidios/mL, así como la solución control de Tween 20 0.05 %. La viabilidad de los conidios se comprobó colocando alícuotas de las suspensiones en medio PDAY con incubación por 8 horas para observar germinación (> 80 %). Para la inoculación de *D. citri,* los insectos fueron colocados dentro de frascos de plástico de 50 mL para ser dormidos a través de la colocación de un algodón con 50 µL de cloroformo durante 1 min. Los insectos dormidos se colocaron en papel secante esterilizado para ser inoculados por asperjado con 2 mL de las suspensiones de conidios. Los insectos inoculados se colocaron en arenas experimentales consistentes de recipientes de plástico de 6 cm de alto por 8 cm de diámetro con una hoja de cítrico

previamente lavada con agua corriente y enjuagada con agua destilada estéril. Con la finalidad de proporcionar humedad a las arenas, fueron colocadas dentro de bolsas de plástico con dos vasos de precipitado de 250 mL con agua destilada, las bolsas se mantuvieron cerradas abriéndose sólo para monitoreo y conteo de insectos en los tratamientos. Las condiciones de incubación de los tratamientos fueron a 25 ± 2 °C, 80 % de humedad y fotoperiodo de 12:12 h luz/oscuridad. Las observaciones fueron realizadas diariamente hasta el cumplimiento del 100 % de mortalidad en uno de los tratamientos. Los insectos muertos se colocaron en cajas Petri con un algodón empapado en agua destilada estéril simulando una cámara de humedad para corroborar el crecimiento del hongo. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con seis tratamientos: cinco concentraciones de conidios más un tratamiento control, cada uno con tres repeticiones. La unidad experimental estuvo constituida por una arena experimental con 20 adultos de *D. citri*. La variable a medir fue el porcentaje de mortalidad de los insectos inoculados. Considerando que el tratamiento control presentó mortalidad de insectos (8.33 %), se utilizó la fórmula de corrección de Abbott (Piepho *et al*., 2024):

$$\text{Mortalidad corregida (\%)} = \frac{Mt-Mc}{100-Mc} \text{ x } 100$$

dónde:
Mt= No. insectos muertos en el tratamiento
Mc= No. insectos muertos en el control

Para realizar el análisis de varianza (ANOVA), se transformaron los porcentajes de mortalidad mediante el arcoseno de la raíz cuadrada ($\sqrt{x}/100$). Se realizó la comparación de medias por Tukey (α=0.05). Para determinar la CL_{50}, CL_{90} y la TL_{50} se utilizó el método Probit. Los análisis fueron realizados con los programas Minitab v.17.1.0 y RStudio v.2026.10.1

Resultados y Discusión

Mortalidad del 100 % se presentó a los siete días de la inoculación con la concentración de $1x10^8$. El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre el porcentaje de mortalidad de los tratamientos ($F_{5,10}$ = 30.89 p = 0.05). Las mejores concentraciones fueron las de $1x10^7$ y $1x10^8$ conidios/mL con porcentajes de mortalidad de 96.36 y 100, respectivamente. Las concentraciones $1x10^4$,$1x10^5$ y $1x10^6$ presentaron porcentajes de mortalidad de 58.18, 60 y 72.72 %, respectivamente (Cuadro 1.)

Autores como Bui *et al*. (2025) obtuvieron resultados similares con *M. anisopliae* en el hemíptero *Aphis gossypii* usando concentraciones de $1x10^7$ y $1x10^8$ conidios/mL en donde reportaron mortalidades a los 10 días de 93 y 100 %; mientras que Buletin y Pardillo (2026) reportaron mortalidades de 90 y 91 % en el hemíptero *Pulvinaria tenuivalvata*. Mortalidades del 100 % también fueron reportadas por Meyer *et al*. (2007) en la cual se trabajó con *Hirsutella* sp. alcanzando esta mortalidad al noveno día.

Cuadro 1. Comparación de medias para mortalidad provocada por diferentes concentraciones de *Metarhizium anisopliae*.

Concentración (conidios/mL)	Mortalidad (%)
$1x10^4$	58.18 ± 11.35^b
$1x10^5$	60.00 ± 8.33^b

$1x10^6$	$72.72±9.45^b$
$1x10^7$	$96.36±3.15^a$
$1x10^8$	$100±0.00^a$

Letras diferentes en cada fila representan diferencia significativa ($p< 0.05$)

La concentración letal media (CL_{50}) fue de $1.35x10^4$ (Intervalo de confianza del 95%: $3.54x10^3$ - $5.12x10^4$), mientras que la concentración letal al 90 % (CL_{90}) fue de $4.66x10^6$ conidios/mL (Intervalo de confianza del 95%: $1.33x10^6$ - $1.63x10^7$, respectivamente. El valor de la CL_{50} es similar que las reportadas por Feng *et al*. (2026) en adultos de *D. citri*. Estos autores obtuvieron valores de $1.89x10^4$ y $5.43x10^4$ conidios/mL para los aislados V3450 y V09 de *Akanthomyces lecanii* respectivamente. Otro factor que podría contribuir a las diferencias entre las concentraciones letales es el método de inoculación del hongo, ya que trabajos como los de Luo *et al*. (2022) inocularon a los adultos mediante inmersión en la solución durante 30 segundos, mientas que en el presente estudio se realizó mediante aspersión con una cantidad establecida por lo cual una misma concentración, dependiendo de la metodología, puede depositar una diferente cantidad de conidios sobre el tegumento del insecto, como se ve en el trabajo de Luo *et al*. (2022) quienes evaluaron *Cordyceps fumosorosea* sobre ninfas y adultos de *D. citri* y obtuvieron una CL_{50} de $4.69x10^6$.

Otros trabajos como los de Wendel *et al*. (2022) obtuvieron resultados con *M. anisopliae* de $5.27x10^6$ y $9.81x10^7$ conidios/mL para los aislados ESALQ E9 y ESALQ1037, respectivamente, a los 7 después de la aplicación. Chen *et al*. (2025) reportaron una CL_{50} de $1.008x10^8$ conidios/mL y por su parte, Orduño-Cruz *et al*. (2015) reportaron $1.38x\ 10^4$ conidios/mL para el aislado M2, también sobre adultos de *D. citri*

El cálculo de la CL_{90} indica la concentración que se requiere bajo condiciones del ensayo, para alcanzar una mortalidad del 90 %, es relevante ya que evalúa un agente de control biológico que suprime una proporción elevada de la población de plagas (Skovmand *et al*., 1997). Un producto con menor CL_{90} requerirá menor cantidad para alcanzar el mismo nivel de control, por lo que es más potente, el cálculo de esta concentración es más útil que la CL_{50} para definir dosis operativas.

Los valores de TL_{50} muestran una disminución en el tiempo estimado para alcanzar el 50 % de mortalidad conforme se incrementó la concentración de conidios, así, el tiempo disminuyó de 5.83 a 3.63 días con las concentraciones de $1x10^4$ y $1x10^8$ conidios/mL, respectivamente (Cuadro 2). Esta tendencia coincide con los resultados de Luo *et al*. (2022) y Yan *et al*. (2022), quienes reportaron una disminución del TL_{50} al incrementar la concentración de conidios de *C. fumosorosea y Aspergillus fijensis*, respectivamente, sobre *D. citri*, esto debido a que la concentración del inóculo puede influir a una respuesta más letal. Autores como Feng *et al*. (2026) estimaron TL_{50} de 4.28 y 3.36 días para adultos de *D. citri* tratados con $1x10^8$ conidios/mL de los aislados de *A. lecanii*, respectivamente, mientras que la cepa CALinC1 a esa concentración reportó 3.63 días acercándose al valor reportado por estos autores. Feng *et al* (2026) relacionan esta respuesta dependiente de la concentración a la disponibilidad de propágulos para la

adhesión y las etapas posteriores de infección.

Cuadro 2. Tiempo letal medio TL_{50} de *Metarhizium anisopliae* CALinC1 sobre adultos de *Diaphorina citri* a diferentes concentraciones

Concentración (conidios/mL)	TL_{50} (días)	IC (días)
$1x10^4$	5.83	4.99-6.82
$1x10^5$	5.72	4.89-6.69
$1x10^6$	5.19	4.59-5.88
$1x10^7$	3.96	3.62-4.32
$1x10^8$	3.63	3.35-3.93

IC: Intervalo de confianza del 95%

Conclusiones

Metarhizium anisopliae CALinC1 presentó actividad patógena contra adultos de *Diaphorina citri* bajo condiciones de laboratorio. Las concentraciones de $1x10^7$ y $1x10^8$ conidios/mL ocasionaron mayor mortalidad que las concentraciones de $1x10^4$ a $1x10^6$ conidios/mL. A los siete días posteriores a la aplicación, las CL50 y la CL90 se estimaron en $1.35x10^4$ y $4.66x10^6$ conidios/mL. El TL_{50} disminuyó de 5.83 a 3.63 días entre las concentraciones de $1x10^4$ y $1x10^8$ conidios/mL, respectivamente lo que indica una mayor rapidez en la acción del hongo a concentraciones altas.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, por la beca otorgada para cursar los estudios de doctorado.

Al proyecto No. A1-S-33091 de CONACYT: Elaboración y evaluación de *Hirsutella citriformis* Speare formulado para mejorar el biocontrol de *Diaphorina citri* Kuwayama y *Bactericera cockerelli* en México.

Referencias Bibliográficas

Bamisile, B. S., Akutse, K. S., Siddiqui, J. A., & Xu, Y. (2021). Model application of entomopathogenic fungi as alternatives to chemical pesticides: Prospects, challenges, and insights for next-generation sustainable agriculture. Frontiers in Plant Science, 12, 741804. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.741804

Berlanga-Padilla, A. M., Gallou, A., Ayala-Zermeño, M. A., Serna-Domínguez, M. G., Montesinos-Matías, R., Rodríguez-Rodríguez, J. C., & Arredondo-Bernal, H. C. (2018). Hongos entomopatógenos asociados a Diaphorina citri (Hemiptera: Liviidae) en Colima, México. Revista Mexicana de Biodiversidad, 89(4), 986–1001. https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.4.2334

Bui, D. K., Hidrayani, & Nurbailis. (2025). Biological control of *Aphis gossypii* on red chili pepper using locally isolated *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae*. *JPT: Jurnal Proteksi Tanaman (Journal of Plant Protection), 9*(2), 95–107.

Buletin, J., & Pardillo, N. (2026). In-vitro evaluation of *Metarhizium anisopliae* as biopesticide for red-striped soft scale insect (*Pulvinaria tenuivalvata*) in sugarcane. *International Journal of Agriculture and Environmental Research, 12*(2), 552–565. https://doi.org/10.51193/IJAER.2026.12214

Casique-Valdés, R., Reyes-Martínez, A. Y., López-Arroyo, J. I., & Sanchez-Peña, S. R. (2024). Fungi associated with the Asian citrus psyllid, Diaphorina citri Kuwayama, in northeastern Mexico. Biocontrol Science and Technology, 34(6),

530–550. https://doi.org/10.1080/09583157.2024.2354377

Chen, D., Suo, J., Yan, J., Chen, L., Chen, F., Huang, J., Duan, H., Ouyang, G., & Meng, X. (2025). Evaluation of laboratory toxicities and field application of plant spray oil and its mixture with Metarhizium anisopliae against Diaphorina citri Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). Insects, 16(7), 663. https://doi.org/10.3390/insects16070663

Corallo, A. B., Pechi, E., Bettucci, L., & Tiscornia, S. (2021). Biological control of the Asian citrus psyllid, Diaphorina citri Kuwayama (Hemiptera: Liviidae) by entomopathogenic fungi and their side effects on natural enemies. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 31, Article 15. https://doi.org/10.1186/s41938-020-00358-2

Cortez-Madrigal, H. (2024). Conservación de enemigos naturales de *Diaphorina citri* y su impacto en Huanglongbing: Análisis y perspectivas. Revista Mexicana de Fitopatología, 42(2), 201–222. https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2307-3

Cortez-Mondaca, E., Pérez-Márquez, J., Ángel-López, M. Á., & Valenzuela-Escoboza, F. A. (2025). Efectividad biológica de imidacloprid sobre el psílido asiático de los cítricos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *16*(2), e3409. https://doi.org/10.29312/remexca.v16i2.3409

Feng, Q., Ghafar, M. A., Wang, F., Hussain, M., Akutse, K. S., Wang, L., & Ismail, A. M. (2026). Exploring the pathogenicity and infection processes of Akanthomyces lecanii against Diaphorina citri for biocontrol applications. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 36, Article 30. https://doi.org/10.1186/s41938-026-00911-5

Gandarilla-Pacheco, F. L., Galán-Wong, L. J., López-Arroyo, J. I., Rodríguez-Guerra, R., & Quintero-Zapata, I. (2013a). Optimization of pathogenicity tests for selection of native isolates of entomopathogenic fungi isolated from citrus-growing areas of México on adults of Diaphorina citri Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). Florida Entomologist, 96(1), 187–195. https://doi.org/10.1653/024.096.0125

Gandarilla-Pacheco, F. L., López-Arroyo, J. I., Galán-Wong, L. J., & Quintero-Zapata, I. (2013b). Patogenicity of native entomopathogenic fungi from the Mexican citrus-growing area against Diaphorina citri Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). Southwestern Entomologist, 38(2), 325–338. https://doi.org/10.3958/059.038.0215

Hall, D. G., Richardson, M. L., Ammar, E.-D., & Halbert, S. E. (2013). Asian citrus psyllid, Diaphorina citri, vector of citrus huanglongbing disease. Entomologia Experimentalis et Applicata, 146(2), 207–223. https://doi.org/10.1111/eea.12025

Hussain, M., Akutse, K. S., Lin, Y., Chen, S., Huang, W., Zhang, J., Idrees, A., Qiu, D., & Wang, L. (2018). Susceptibilities of Candidatus Liberibacter asiaticus-infected and noninfected Diaphorina citri to entomopathogenic fungi and their detoxification enzyme activities under different temperatures. MicrobiologyOpen, 7(6), e00607. https://doi.org/10.1002/mbo3.607

Landa-Cadena, M. G., Trigos, Á., Hernández-Rosas, F., & Salinas-Castro, A. (2025). Identification of

entomopathogenic fungi for the biological control of Diaphorina citri in citrus trees. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 28(1), Article 008. https://doi.org/10.56369/tsaes.5733

Luo, Y., Wu, S., He, X., Wang, D., He, Y., & Nian, X. (2022). Identification of a Cordyceps fumosorosea fungus isolate and its pathogenicity against Asian citrus psyllid, Diaphorina citri (Hemiptera: Liviidae). Insects, 13(4), 374.

Meyer, J. M., Hoy, M. A., & Boucias, D. G. (2007). Morphological and molecular characterization of a Hirsutella species infecting the Asian citrus psyllid, Diaphorina citri Kuwayama (Hemiptera: Psyllidae), in Florida. Journal of Invertebrate Pathology, 95, 101–109.

Orduño-Cruz, N., Guzmán-Franco, A. W., & Rodríguez-Leyva, E. (2016). *Diaphorina citri* populations carrying the bacterial plant pathogen *Candidatus Liberibacter asiaticus* are more susceptible to infection by entomopathogenic fungi than bacteria-free populations. *Agricultural and Forest Entomology, 18*(1), 95–98. https://doi.org/10.1111/afe.12138

Piepho, H., Malik, W. A., Bischoff, R., El-Hasan, A., Scheer, C., Sedlmeier, J. E., Gerhards, R., Petschenka, G., & Voegele, R. T. (2024). Efficacy assessment in crop protection: a tutorial on the use of Abbott's formula. *Journal Of Plant Diseases And Protection*, *131*(6), 2139-2160. https://doi.org/10.1007/s41348-024-00968-0

Skovmand, O., Hoegh, D., Pedersen, H. S., & Rasmussen, T. (1997). Parameters influencing potency of Bacillus thuringiensis var. israelensis products. Journal of Economic Entomology, 90(2), 361–369. https://doi.org/10.1093/jee/90.2.361

Wendel, J., Cisneros, J., Jaronski, S., Vitek, C., Ciomperlik, M., & Flores, D. (2022). Screening commercial entomopathogenic fungi for the management of *Diaphorina citri* populations in the Lower Rio Grande Valley, Texas, USA. *BioControl, 67*(2), 225–235. https://doi.org/10.1007/s10526-021-10128-0

Yan, J., Liu, H., Idrees, A., Chen, F., Lu, H., Ouyang, G., & Meng, X. (2022). First record of Aspergillus fijiensis as an entomopathogenic fungus against Asian citrus psyllid, Diaphorina citri Kuwayama (Hemiptera: Liviidae). Journal of Fungi, 8(11), 1222. https://doi.org/10.3390/jof8111222

Incremento de las propiedades funcionales en maíz mediante nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas con *Moringa oleífera*

Eddaliz García-Reyes[1*]; Josué I. García-López[2]; Emilio Olivares-Sáenz[1]; Vania Urías-Orona[3]; José Elías Treviño-Ramírez[1]; Guillermo Niño-Medina[1*]
[1]Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía, Laboratorio de Química y Bioquímica, Francisco Villa S/N, Col. Ex-Hacienda El Canadá, C.P. 66050 General Escobedo, Nuevo León, México.
[2]Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Fitomejoramiento, Saltillo, Coahuila CP 25315, México
[3]Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Salud Pública y Nutrición, Laboratorio de Química de Alimentos, Av. Dr. Eduardo Aguirre Pequeño y Yuriria, Col. Mitras Centro, C.P. 64460 Monterrey, Nuevo León, México.
*Email: eddaliz.garciar@uanl.edu.mx

Resumen: El maíz es la principal fuente de nutrientes de los mexicanos y se utiliza en más de 600 recetas (tortilla, totopos, atole, gorditas, etc.). El maíz blanco es el más preferido para consumo humano, sin embargo, el contenido de compuestos nutricionales y funcionales son bajos. Actualmente se busca obtener alimentos biofortificados, pues se ha demostrado que son la mejor fuente de Zn en comparación con los suplementos. El objetivo de este estudio fue evaluar el incremento de las propiedades funcionales en maíz cultivadas bajo diferentes fuentes de zinc: sulfato de zinc ($ZnSO_4$), nanopartículas de óxido de zinc comerciales (NPs ZnO) y nanopartículas de óxido de zinc sintetizadas con *Moringa oleífera* (NPs ZnO-M) a diferentes concentraciones. Los resultados indicaron diferencias entre las fuentes de Zn y las concentraciones en el contenido de fenoles libres y la capacidad antioxidante. Las NPs ZnO-M presentaron el mayor contenido de fenoles libres a 50 ppm (950.59 mg GAE/kg). El mayor contenido la capacidad antioxidante por DPPH fue con las NPs ZnO (2935.91 µmol TE/kg); por ABTS fue con las NPs ZnO-M (6136.35 y 24435.81 µmol TE/kg libre y ligado); y por el método FRAP ambas NPs (NPs ZnO y NPs ZnO-M) presentaron los mayores aumentos (4143.47 y 3874.18 µmol TE/kg). Las nanopartículas de ZnO mejoran las propiedades funcionales del grano mediante la estimulación del metabolismo antioxidante a bajas concentraciones.
Palabras clave. *Zea mays* L., nanopartículas de óxido de zinc, síntesis verde, fenoles, capacidad antioxidante.

Abstract: Corn is the primary source of nutrients for Mexicans and is used in more than 600 food recipes (tortillas, tortilla chips, atole, gorditas, etc.). White corn is the most preferred variety for human consumption; however, its content of nutritional and functional compounds is low. Efforts are currently underway to develop biofortified foods, as they have been shown to be the best source of zinc compared to supplements. The objective of this study was to evaluate the enhancement of functional properties in corn (*Zea mays* L.) grown under different zinc sources: zinc sulfate ($ZnSO_4$), commercial nanoparticles zinc oxide (ZnO NPs), and nanoparticles zinc oxide synthesized with Moringa oleifera (ZnO-M NPs) at different concentrations. The results indicated differences among the Zn sources and concentrations in free phenol content and antioxidant capacity. The ZnO-M NPs exhibited the highest free phenol content at 50 ppm (950.59 mg GAE/kg). The highest antioxidant capacity by DPPH was observed with the ZnO NPs (2935.91 µmol TE/kg); by ABTS, it was with ZnO-M NPs

(6136.35 and 24435.81 µmol TE/kg for free and bound, respectively); and by FRAP method, both NPs (ZnO NPs and ZnO-M NPs) showed the greatest increases (4143.47 and 3874.18 µmol TE/kg). Both nanoparticles ZnO improve the functional properties of the grain by stimulating antioxidant metabolism at low concentrations.
Keywords: *Zea mays* L., zinc oxide nanoparticles, green-synthesized, phenols, antioxidant capacity.

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es el tercer cultivo más importante a nivel mundial después del trigo y el arroz, y es el cultivo agrícola más importante de México en diversas áreas como el alimentario, industrial, político, económico y social (García *et al*., 2022). Es el principal alimento (tortilla, totopos, atole, gorditas, etc.) y fuente de nutrientes de los mexicanos, con un consumo promedio per cápita al año de 331.9 kg de maíz (Urango, 2018). México cuenta con 59 razas nativas, con diferentes características y contenidos nutricionales, sin embargo, el maíz blanco que cuenta con niveles bajos de nutrientes y propiedades funcionales es el preferido para consumo humano (García *et al*., 2022).

El desarrollo del cultivo y la deficiencia de nutrientes en maíz, pueden ser influenciadas por diversos factores, entre ellos, la disponibilidad de micronutrientes esenciales como el zinc (Zn) (Alloway, 2008; SAGARPA, 2017). El zinc es vital en los procesos bioquímicos de las plantas, es el único metal presente en las seis clases de enzimas: hidrolasas, transferasas, oxidorreductasas, isomerasas, ligasas y liasas, mejora la fertilización, fecundación y producción de biomasa, participa en la síntesis de proteínas (ARN y ADN), mejora la concentración de triptófano (α-aminoácido) que a su vez funge como precursor de la auxina IAA (ácido indol-3-acético), importante en la división y elongación celular; como resultado de esto existe mayor actividad fotosíntetica, traslocación de fotoasimilados y absorción de N, P, K, Zn en el grano (Dimkpa *et al*., 2017; Elshayb *et al*., 2021). El Zn en el cuerpo humano es crucial para evitar daños en el tracto gastrointestinal, el sistema nervioso central, el sistema inmunológico, el esqueleto y el sistema nervioso. Los niveles bajos de Zn en el organismo también son responsables de múltiples trastornos fisiológicos, como la apoptosis, la destrucción de órganos, las lesiones del ADN y el daño oxidativo de los componentes celulares a través de las especies reactivas del oxígeno (ROS). El daño oxidativo provoca una inflamación crónica que conduce a varias enfermedades crónicas, como enfermedades cardíacas, cánceres, enfermedades relacionadas con el alcohol, contracciones musculares y neuropatogénesis (Hussain *et al*., 2022). La importancia del Zn radica en que al menos el 6 % del proteoma procariótico y el 9 % del proteoma eucariótico utilizan Zn (Stanton *et al*., 2022).

Se considera que el maíz es muy sensible a la baja disponibilidad de Zn en el suelo (Alloway, 2008). Además, el zinc forma parte de un grupo de enzimas que ayudan a regular y activar la absorción del nitrógeno disponible en el suelo por las plantas de cultivo (Al-Taee y Alamery, 2025). Los agricultores realizan aplicaciones de

distintas fuentes de zinc, como el sulfato de zinc ($ZnSO_4$), quelatos de zinc, oxido de zinc (ZnO) y nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO) vía foliar y al suelo, para contrarrestar la deficiencia de Zn y asegurar un buen desarrollo del cultivo. Sin embargo, hoy en día se buscan nuevas alternativas de fertilización como la aplicación de nanopartículas de óxido de Zn de síntesis verde que sean amigables con el medio ambiente. Las nanopartículas derivadas de extractos vegetales, como las de *Moringa oleifera*, han ganado interés en la investigación debido a sus propiedades bioactivas y biocompatibles, que podrían potenciar la germinación y el desarrollo de cultivos sin los riesgos asociados al uso de productos de síntesis química (Ibrahim *et al*., 2018).

Las NPs orgánicas sustituyen agentes químicos por extractos naturales o microorganismos (plantas, bacterias y algas), con gran utilidad por su facilidad, eficacia, no toxicidad y reducción de iones metálicos, estrategia más segura y ecológica; las plantas en comparación con bacterias y algas presentan menor toxicidad ofreciendo así un sustituto verde de la biosíntesis de nanopartículas (Rivera-Rangel *et al*., 2018; Vera, Farías & Castañeda, 2017).

Actualmente se busca obtener alimentos biofortificados y funcional que aporten mayor contenido nutricional al ser humano, pues se ha demostrado que los alimentos biofortificados son la mejor fuente de Zn en comparación con los suplementos químicos para evitar sus efectos negativos en los seres humanos.

La síntesis verde de NP ZnO utiliza compuestos fenólicos de las plantas como reductores y estabilizantes, lo cual puede influir en la efectividad en generar compuestos bioactivos y en activar el sistema enzimático de defensa debido a que son más biocompatibles (Swain *et al*., 2025). El objetivo de este trabajo fue evaluar el contenido de fenoles y la capacidad antioxidante en granos de maíz cultivadas con diferentes fuentes de Zn comerciales ($ZnSO_4$, NPs ZnO) y de síntesis verde (NPs ZnO-M).

Materiales y Métodos

Material vegetal y productos químicos

Para este estudio se utilizaron semillas de maíz del híbrido AN 447, proporcionado por el Instituto de Maíz de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), Saltillo, Coahuila, México.

Las nanopartículas comerciales de óxido de Zn (NPs ZnO) y el sulfato de Zn ($ZnSO_4$ $7H_2O$) se adquirieron de Sigma-Aldrich (San Luis, Misuri, USA). Las hojas de *Moringa Oleifera* utilizadas para la síntesis verde de nanopartículas de ZnO (NPs ZnO-M) se recolectaron en General Escobedo, Nuevo León, en las coordenadas 100° 18′ 58″ de longitud oeste y 25° 46′ 49″de latitud norte, a una altura de 495 m sobre el nivel del mar. Posteriormente se sintetizaron en el Laboratorio de Ciencias Básicas de la UAAAN.

Preparación del extracto de Moringa Oleifera

Hojas de *Moringa Oleifera* se secaron a temperatura ambiente y se molieron en un molino planetario Pulverisette 6 (Idar-

Oberstein, Renania-Palatinado, DE). Posteriormente, el polvo se tamizó a 250 µm usando tamices Tyler (Guadalajara, Jalisco, Mex), y se pesaron seis g que fueron mezclados con 600 mL de etanol, la mezcla fue colocada en un matraz de tres bocas provisto con un refrigerante y reflujo durante 2 h a 70 °C. Finalmente, el extracto se filtró dos veces al vació con papel filtro y se guardó en refrigeración para su posterior uso.

Síntesis verde de nanopartículas de óxido de zinc (NPs ZnO-M

La síntesis de *NPs ZnO-M* fue realizada en un matraz bola provisto de tres bocas, dónde se colocaron 13.7 g de Zn $(AcO)_2$ y 600 mL del extracto obtenido en la etapa anterior. Esta solución se agitó constantemente a una temperatura de 75 °C en reflujo durante 2 h. Después, se adicionó una solución acuosa 0.2 M de NaOH gota a gota para ajustar el pH a 8 y se mantuvo en agitación constante durante 24 h. Posteriormente, las NPs obtenidas inmersas fueron centrifugadas a 15,000 rpm durante 5 min para recuperarlas. El precipitado fue lavado dos veces con etanol y secado en una estufa a 60 °C por 24 h. Enseguida, las NPs fueron calcinadas en una mufla y finalmente fueron trituradas en un mortero para obtener un polvo fino (Naiel *et al*., 2022).

Establecimiento del experimento

Para obtener los granos para evaluación se estableció el primer ciclo de cultivo durante Enero-Junio 2025 en el invernadero tipo gótico, con condiciones de cielo abierto, en la Facultad de Agronomía (FA) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), ubicada en General Escobedo, Nuevo León, en las coordenadas 100° 18′ 58″ de longitud oeste y 25° 46′ 49″de latitud norte, a una altura de 495 m sobre el nivel del mar.

Se utilizó suelo como sustrato, el cual se obtuvo del invernadero tipo gótico, se mezcló para homogenizar, cribó y posteriormente se colocaron 20 kg en cada maceta.

La siembra se efectuó manualmente el 30 de enero del 2025, con una densidad de 2 plantas por maceta. Las macetas se colocaron en separaciones de 0.20 m entre plantas y 0.80 m entre hileras, en condiciones de riego por goteo.

Se aplicó una dosis de fertilización de 120 unidades de N, 80 P y 80 K, de acuerdo con el análisis de suelo, se aplicó en su totalidad al momento de la siembra, así mismo las fuentes de Zn. El manejo agronómico, incluyendo el control de malezas, plagas y enfermedades, fue uniforme.

Extractos de compuestos fenólicos libres y ligados

La extracción de los compuestos fenólicos libres y ligados se llevó a cabo como se describe en (Rodríguez-Salinas *et al*., 2020). Para la extracción, se pesaron 200 mg de la muestra, se suspendieron en 3 mL de metanol al 80 %, se purgaron con nitrógeno durante 30 s y se agitaron durante 2 h a 250 rpm en la oscuridad. Posteriormente, las muestras se centrifugaron a 5,000 rpm a 4 °C durante 5 min; se recuperó el sobrenadante y se conservó a -20 °C hasta su análisis. Los compuestos fenólicos ligados se obtuvieron a partir del residuo sólido de los

compuestos fenólicos solubles mediante el tratamiento de la muestra con 5 mL de NaOH 2 M durante 2 h bajo agitación en oscuridad. Posteriormente, se ajustó el pH de la muestra a 2.5 con 1 mL de HCl concentrado, y se extrajeron los compuestos fenólicos dos veces con 5 mL de éter dietílico. Los extractos de éter dietílico se combinaron y se evaporaron hasta secarse en un rotavapor Yamato Scientific Co., Ltd. RE200 (Harumi, Chuo-ku, Tokio), con un baño de agua YAMATO BM200, y, finalmente, las muestras se disolvieron en metanol al 80 %.

Determinación de fenoles (libres y ligados)

La determinación del contenido fenólico total se llevó a cabo utilizando el reactivo de Folin-Ciocalteu. Se añadió un volumen de 0.2 mL de extracto fenólico a 2.6 mL de una solución al 7 % de Na_2CO_3. Se dejó que la reacción se desarrollara durante 90 min y se midió la absorbancia de las muestras a 750 nm utilizando un espectrofotómetro DLAB SP-UV1100. Se utilizó ácido gálico como patrón para la curva de calibración (0, 40, 80, 120, 160 y 200 mg/l), y los resultados se expresaron en miligramos equivalentes de ácido gálico por cada kg de muestra (mg GAE/kg) (Rodríguez-Salinas *et al*., 2020).

Determinación de capacidad antioxidante (libres y ligados)

Los ensayos de capacidad antioxidante para ABTS (sal de diamonio del ácido 2,2′-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)), DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) y FRAP (capacidad antioxidante de reducción férrica) se realizaron de acuerdo con Rodríguez-Salinas *et al.* (2019). Los resultados fueron reportados en micromoles de Trolox (Ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico) equivalentes por kg de muestra (µmol TE/kg), tomando como referencia la curva de calibración de Trolox (0 a 500 µmol/L).

DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo)

El ensayo del DPPH se realizó utilizando una solución de trabajo de 60 µM, con la absorbancia ajustada a 0.7 a 517 nm. El ensayo se llevó a cabo mezclando 0.2 mL de extracto fenólico con 3 mL de la solución de trabajo de DPPH; se dejó que la reacción se desarrollara durante 30 min en la oscuridad y se determinó la reducción de la absorbancia del DPPH.

ABTS (sal de diamonio del ácido 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico)).

La solución de trabajo de ABTS se preparó mezclando 1 mL de ABTS a 7.4 mM y 1 mL de $K_2S_2O_8$ a 2.6 mM, y dejando que reaccionaran durante 12 h en la oscuridad. Transcurrido este tiempo, se ajustó la absorbancia de la solución de trabajo a 0.7 a 734 nm mediante dilución con metanol al 80 %. El ensayo con ABTS se llevó a cabo mezclando 100 µL de extracto fenólico con 3 mL de la solución de trabajo de ABTS; se dejó que la reacción se desarrollara durante 30 min en la oscuridad y se midió la reducción de la absorbancia ABTS.

FRAP (capacidad antioxidante de reducción férrica)

El ensayo FRAP se determinó utilizando una solución de trabajo preparada mediante la mezcla de 300 mM de $C_2H_3NaO_2{\cdot}3H_2O$ (pH 3.6), 10 mM de TPTZ (2,4,6-tripiridil-s-triazina, en HCl 40 mM) y 20 mM de $FeCl_3{\cdot}6H_2O$ en una proporción de 10:1:1. El ensayo FRAP se llevó a cabo mezclando 100 µL de extracto fenólico con 3 mL de la

solución de trabajo FRAP; se dejó que la reacción se desarrollara durante 30 min en la oscuridad a 37 °C, y se midió la absorbancia de las muestras a 593 nm.

Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se organizó mediante un diseño factorial completamente aleatorizado con tres tratamientos ($ZnSO_4$, NPs ZnO, M-NPs ZnO) + el control y 4 concentraciones (25, 50, 75, 100 ppm). El modelo lineal general fue $Yij= \mu+\alpha i+\beta j+(\alpha\beta)ij+eij$; donde Yij= la variable de respuesta; μ= media general; αi= efecto de los tratamientos; βj= efecto de las concentraciones; (αβ)ij= interacción de tratamientos por concentraciones; eij= error experimental. Los resultados se presentaron como media ± desviación estándar de cuatro muestras. Las medias de los tratamientos se compararon por la prueba de medias de Tuckey ($p \leq 0.05$), utilizando el paquete estadístico IMB SPSS statistics versión 27.0 (IBM Corp., Armonk, N.Y., EE. UU.).

Resultados y Discusión

Caracterización de nanopartículas

La morfología y el tamaño de las nanopartículas fue determinada mediante TEM. En la micrografía de la izquierda se observan las NPs ZnO-M las cuales poseen una morfología esférica, con tamaños de partícula comprendidos entre 25 y 85 nm, y aproximadamente el 39 % de las nanopartículas se situaban en torno a los 25 nm (Figura 1a).

Por su parte, las NPs ZnO (micrografía de la derecha) mostraron una morfología heterogénea, en la que destacaban partículas esféricas y en forma de bastoncillos, con tamaños que oscilaban entre 15 y 85 nm, y aproximadamente el 32 % de las nanopartículas en torno a los 25 nm (Figura 1b).

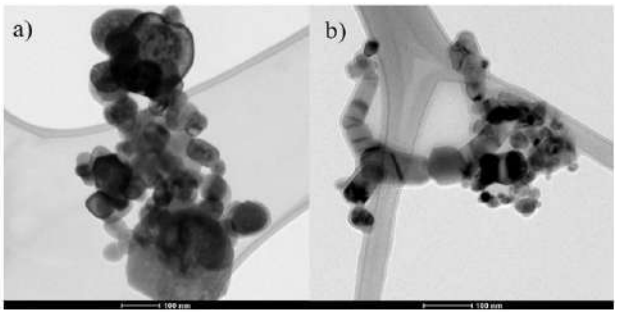


Figura 1. Micrografías obtenidas mediante TEM de a) NPs ZnO-M y b) NPs ZnO.

Fenoles (libre y ligados)

El contenido de fenoles libres y la capacidad antioxidante fueron estadísticamente diferentes en la interacción entre las fuentes de Zn utilizadas y las concentraciones (ANOVA $p \leq 0.05$). Los granos cultivados con NPs ZnO-M presentaron el mayor contenido de fenoles libres a 50 ppm (950.59 mg GAE/kg), seguido de las NPs ZnO (931.64 mg GAE/kg) a 100 ppm (Figura 2a). El contenido de fenoles ligados fue estadísticamente igual en todos los tratamientos y concentraciones.

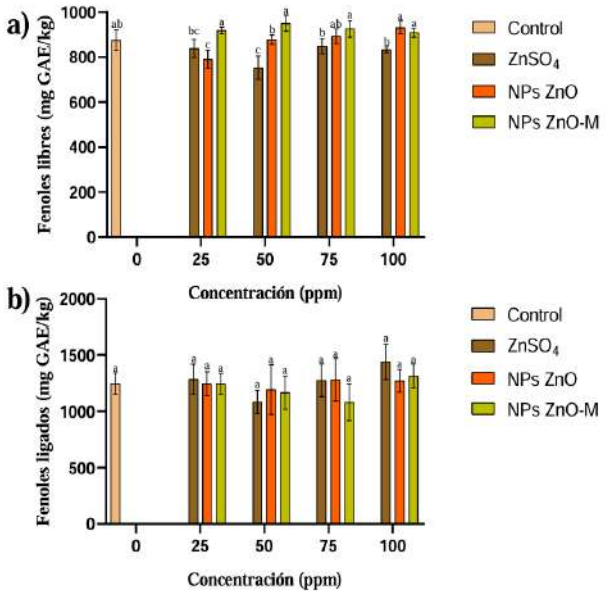


Figura 2. Contenido de fenoles en granos de maíz cultivados con $ZnSO_4$, NPs ZnO y NPs ZnO-M a diferentes concentraciones (ppm). Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

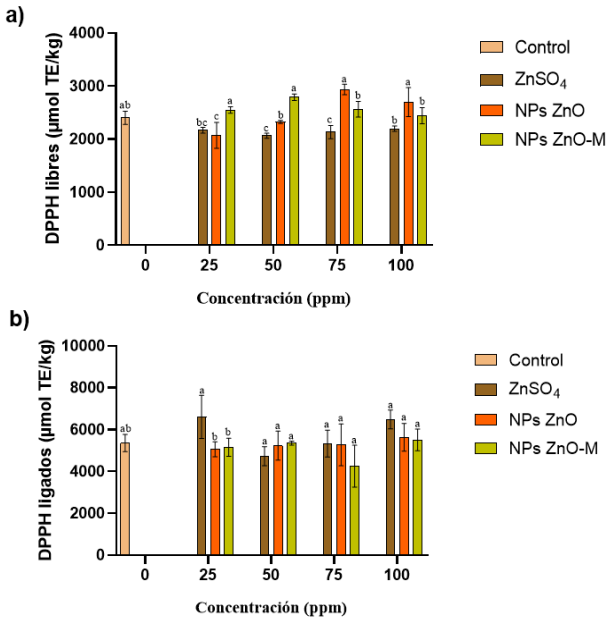


Figura 3. Contenido de capacidad antioxidante por el método DPPH en granos de maíz cultivados con $ZnSO_4$, NPs ZnO y NPs ZnO-M a diferentes concentraciones (ppm). Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Capacidad antioxidante

El tratamiento con $ZnSO_4$ redujo el contenido de capacidad antioxidantes en todas las concentraciones por DPPH libre (2,140.37 µmol TE/kg) comparado al control (2,402.14 µmol TE/kg), mientras que las NPs ZnO aumentaron el contenido a partir de 75 ppm (2,935.91 µmol TE/kg), y las NPs ZnO-M presentaron los mayores aumentos a 50 ppm (2,789.31 µmol TE/kg) (Figura 3a). A 25 ppm las NPs presentaron los niveles más bajos de capacidad antioxidante por DPPH en ligado (Figura 3b).

Por el método ABTS, la aplicación de las NPs ZnO-M presentó el mayor aumento en todas las concentraciones en forma libre (6,136.35 µmol TE/kg), seguido de NPs ZnO (5,537.88 µmol TE/kg) como se observa en la Figura 4a y b. Así mismo, las NPs ZnO-M presentaron la mayor capacidad antioxidante a 100 ppm (24,435.81 µmol TE/kg) por ABTS ligado.

Las NPs (NPs ZnO y NPs ZnO-M) presentaron los mayores aumentos a 75 ppm (4,143.47 y 3,874.18 µmol TE/kg) por FRAP en forma libre. En ligados, el $ZnSO_4$ mostró el mayor aumento de capacidad antioxidante a 75 y 100 ppm (13,821.66 y 13,744.98 µmol TE/kg) como se observa en la Figura 5a y b.

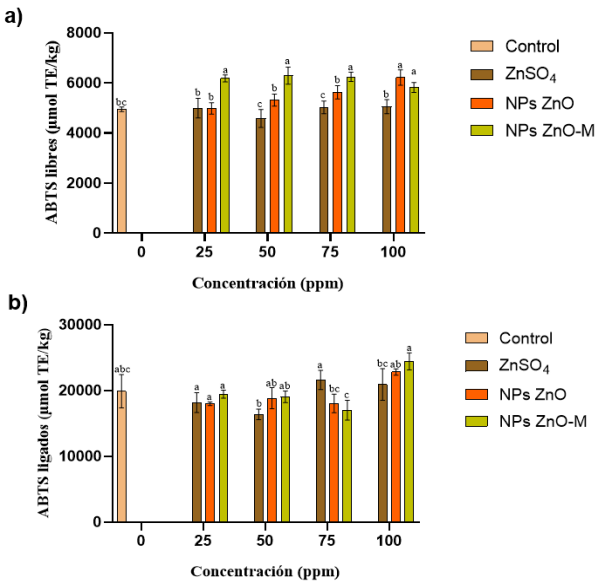


Figura 4. Contenido de capacidad antioxidante por el método ABTS en granos de maíz cultivados con $ZnSO_4$, NPs ZnO y NPs ZnO-M a diferentes concentraciones (ppm). Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Feregrino-Pérez *et al.* (2024) reportó valores de 3,455.0 mg GAE/kg en el contenido de fenoles totales, 2,770.0 µmol TE/kg de muestra FRAP en grano de maíz blanco sin biofortificar en una variedad nativa de Querétaro (Ratón-Tuxpeño Norteño) y, en un híbrido comercial el contenido de fenoles totales fue de 34,550.0 mg GAE/kg y el contenido de capacidad antioxidante FRAP fue de 356.0 µmol TE/kg de muestra.

Por otro lado, la aplicación de NPs ZnO vía foliar (floración, grano en fase de ampolla, grano lechoso y grano lleno o dentado) mostró aumentos en el contenido de fenoles de 390 (100 ppm) a 490 (400 ppm) mg GAE/kg 100 g de muestra, mostrando el mayor aumento a 400 ppm (18 %) respecto al control. Mientras que el contenido de capacidad antioxidante por el método ABTS fue mayor a 100 y 200 ppm (2460 y 2500 µmolTE/ 100 g de muestra). El TEAC mejoró un 12 % a 14 % en todos los tratamientos en comparación con el control (Sánchez-Estrada *et al.*, 2026).

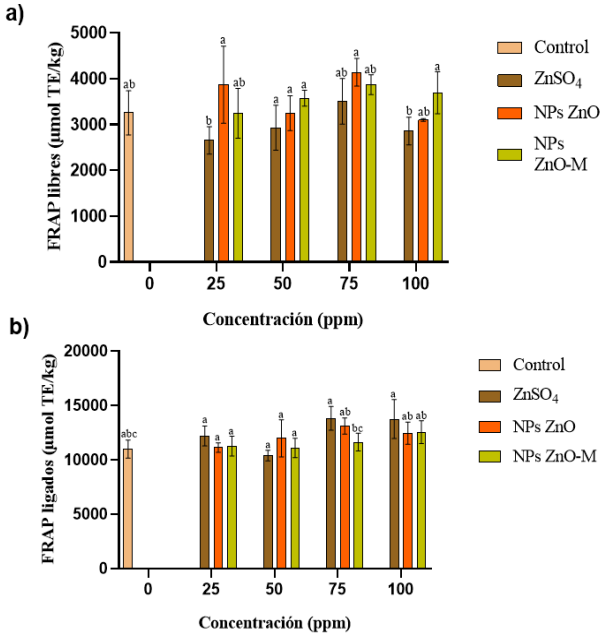


Figura 5. Contenido de capacidad antioxidante por el método FRAP en granos de maíz cultivados con $ZnSO_4$, NPs ZnO y NPs ZnO-M a diferentes concentraciones (ppm). Letras diferentes en cada barra significan que los tratamientos fueron estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

Los aumentos en flavonoides, fenoles y capacidad antioxidante indican que las nanopartículas de ZnO mejoran la calidad funcional del grano de maíz (Sánchez-Estrada *et al.*, 2026).

La aplicación foliar de Zn en maíz aumentó ligeramente los fenoles totales (1.13 mg GAE/g) respecto al control (1.06 mg GAE/g), los flavonoides (0.53 a 0.59 mg QE/g) y los carotenoides (4.21 a 5.43 µg/g). En la capacidad antioxidante el contenido varío dependiendo del método evaluado, por el método DPPH aumentó de 309 µmolTE/ 100 g (control) a 338 µmolTE/ 100 g, mientras que FRAP disminuyó de 428 a 417 µmolTE/ 100 g y por el método TEAC

disminuyó de 449 a 410 µmolTE/ 100 g respecto al control (Jarecki *et al*., 2025).

Se ha reportado un incremento en el contenido de clorofila, carotenoides y antocianinas en maíz con la aplicación de NPS ZnO sintetizadas con *Lemna minor* (Del Buono *et al*., 2021). La aplicación de nanopartículas de ZnO también mejoró la concentración de Zn en los granos de maíz con aplicación al suelo (59 %) (Umar *et al*., 2021). Las nanopartículas de ZnO muestran una mejora máxima en los parámetros de los cultivos en comparación con otras fuentes, debido a su mayor absorción y translocación en las plantas, tanto en condiciones normales como de estrés hídrico en el suelo (Mazhar *et al*., 2022).

El incremento significativo en el contenido de fenoles libres observado a 50 ppm en el tratamiento con NPs ZnO-M posiblemente es debido a la activación del metabolismo secundario de la vía del fenilpropano, el cual se da como una respuesta fisiológica a estímulos abióticos moderados, donde las nanopartículas actúan como elicitores, promoviendo la biosíntesis de compuestos fenólicos con funciones antioxidantes (Hussain *et al*., 2024). Estudios metabolómicos en maíz han identificado que ácidos fenólicos como el ácido ferúlico y p-cumárico contribuyen significativamente a la capacidad antioxidante del grano, y su acumulación puede ser modulada por factores nutricionales y agronómicos (Zhang *et al*., 2020).

Por otra parte, el efecto observado en los tratamientos con $ZnSO_4$ podría atribuirse a una menor eficiencia en la absorción y transporte del zinc en forma iónica, así como a posibles efectos de toxicidad a determinadas concentraciones. Por otro lado, las NPs ZnO presentan propiedades fisicoquímicas que favorecen su interacción con los tejidos vegetales, como un mayor tamaño superficial y una liberación controlada del nutriente, lo que incrementa su biodisponibilidad y eficiencia fisiológica (Swain *et al*., 2025). El mayor incremento detectado por los métodos ABTS y FRAP se podría atribuir a presencia de mayores compuestos con alta capacidad reductora y solubilidad en medios acuosos, lo cual es característico de los ácidos fenólicos presentes en el maíz (Zhang *et al*., 2024). El Zn está involucrado en la biosíntesis de compuestos fenólicos a través de las vías del ácido shikímico y acetato–malato (Rana y Chahal, 2023), y de genes de la vía del fenilpropanoide (Mishra *et al*., 2019).

Las NPs ZnO actúan como nano-fertilizantes y bioestimulantes, mejorando no solo el crecimiento sino también la síntesis de antioxidantes en cultivos. Las NPs ZnO obtenidas mediante síntesis verde y convencional son más efectivas en generar compuestos bioactivos (clorofila a, fenólicos totales y contenido de flavonoides, además de la proteína total) y en activar el sistema enzimático de defensa (Salih *et al*., 2021; Sánchez-Pérez *et al*., 2023). Además, la capacidad de las NPs ZnO para modular rutas antioxidantes y metabólicas en plantas son una alternativa para la biofortificación y mejora funcional de cultivos (Umar *et al*., 2021).

Conclusiones

Las nanopartículas de óxido de zinc, mejoran las propiedades funcionales del

grano mediante la estimulación del metabolismo antioxidante a bajas concentraciones.

Agradecimientos

A la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León por permitirme continuar con mis estudios de Doctorado en Ciencias Agrícolas, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca número: 841661 otorgada. Al comité de asesoría por su apoyo para llevar a cabo el proyecto de investigación.

Referencias Bibliográficas

Alloway, B. J. (2008). Zinc in Soils and Crop Nutrition. International Zinc Association and International Fertilizer Association, 16.

Al-Taee, E. A. O., & Alamery, A. A. (2025). Effect of sulfur, thiobacillus bacteria, and nano-zinc on biochemical characteristics and grain yield of maize in calcareous soil. http://doi.org/10.54910/sabrao2025.57.2.41

Del Buono, D., Di Michele, A., Costantino, F., Trevisan, M., & Lucini, L. (2021). Biogenic ZnO nanoparticles synthesized using a novel plant extract: Application to enhance physiological and biochemical traits in maize. *Nanomaterials*, *11*(5), 1270. https://doi.org/10.3390/nano11051270

Dimkpa, C.O.; White, J.C.; Elmer, W.H.; Gardea-Torresdey, J. 2017. Nanoparticle and ionic Zn promote nutrient loading of sor-ghum grain under low NPK fertilization. *J. Agric. Food Chem*. 65, 8552–8559. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02961

Elshayb, O. M., Farroh, K. Y., Amin, H. E., & Atta, A. M. (2021). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: fortification for rice grain yield and nutrients uptake enhancement. Molecules, 26(3), 584. https://doi.org/10.3390/molecules26030584

Feregrino-Pérez, A. A., Mercado-Luna, A., Murillo-Cárdenas, C. A., González-Santos, R., Chávez-Servín, J. L., Vargas-Madriz, A. F., & Luna-Sánchez, E. (2024). Polyphenolic compounds and antioxidant capacity in native maize of the Sierra Gorda of Querétaro. *Agronomy*, *14*(1), 142. https://doi.org/10.3390/agronomy14010142

García-Reyes, E., Flores Naveda, A., Ruiz 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). *Revista Temas de Ciencia y Tecnología*, 26(77), 13-19. http://repositorio.utm.mx:8080/jspui/handle/123456789/449

Hussain, A., Jiang, W., Wang, X., Shahid, S., Saba, N., Ahmad, M., ... & Mustafa, A. (2022). Mechanistic impact of zinc deficiency in human development. *Frontiers in Nutrition*, *9*,

717064. Doi: 10.3389/fnut.2022.717064

Hussain, M., Kaousar, R., Haq, S. I. U., Shan, C., Wang, G., Rafique, N., ... & Lan, Y. (2024). Zinc-oxide nanoparticles ameliorated the phytotoxic hazards of cadmium toxicity in maize plants by regulating primary metabolites and antioxidants activity. *Frontiers in Plant Science*, *15*, 1346427. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1346427

Ibrahim, H. M., Zahran, M. K., & Mohamed, M. A. (2018). Synthesis and characterization of silver nanoparticles using Moringa oleifera leaf extract and its antibacterial activity. Arabian Journal of Chemistry, 11(5), 849-855.

Jarecki, W., Borza, I. M., Rosan, C. A., Domuța, C. G., & Vicas, S. I. (2025). The effect of foliar micronutrient fertilization on yield and nutritional quality of maize grain. *Agronomy*, *15*(8), 1859. https://doi.org/10.3390/agronomy15081859

Mazhar, Z., Akhtar, J., Alhodaib, A., Naz, T., Zafar, M. I., Iqbal, M. M., ... & Naz, I. (2022). Efficacy of ZnO nanoparticles in Zn fortification and partitioning of wheat and rice grains under salt stress. *Scientific reports*, *13*(1), 2022. https://doi.org/10.1038/s41598-022-26039-8

Mishra, V. K., Gupta, S., Chand, R., Yadav, P. S., Singh, S. K., Joshi, A. K., & Varadwaj, P. K. (2019). Comparative transcriptomic profiling of high-and low-grain zinc and iron containing Indian wheat genotypes. Current Plant Biology, 18, 100105. https://doi.org/10.1016/j.cpb.2019.100105.

Naiel, B., Fawzy, M., Halmy, M. W. A., and Mahmoud, A. E. D. (2022). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using Sea Lavender (*Limonium pruinosum* L. Chaz.) extract: characterization, evaluation of anti-skin cancer, antimicrobial and antioxidant potentials. Scientific Reports, 12(1), 20370. https://doi.org/10.1038/s41598-022-24805-2

Rana, B., & Chahal, K. (2023). Phenolic compounds under stress. In Plant Metabolites under Environmental Stress (pp. 203-218). Apple Academic Press.

Rivera-Rangel, R. D., González-Muñoz, M. P., Avila-Rodriguez, M., Razo-Lazcano, T. A., & Solans, C. (2018). Green synthesis of silver nanoparticles in oil-in-water microemulsion and nano-emulsion using geranium leaf aqueous extract as a reducing agent. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 536, 60-67. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.07.051

Rodriguez-Salinas, P. A., Zavala-Garcia, F., Urias-Orona, V., Muy-Rangel, D., Heredia, J. B., & Nino-Medina, G. (2020). Chromatic, nutritional and nutraceutical properties of pigmented native maize (*Zea mays* L.) genotypes from the northeast of

Mexico. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *45*(1), 95-112. https://doi.org/10.1007/s13369-019-04086-0

Salih, A. M., Al-Qurainy, F., Khan, S., Tarroum, M., Nadeem, M., Shaikhaldein, H. O., ... & Alfarraj, N. S. (2021). Biosynthesis of zinc oxide nanoparticles using Phoenix dactylifera and their effect on biomass and phytochemical compounds in *Juniperus procera*. *Scientific reports*, 11(1), 19136. https://doi.org/10.1038/s41598-021-98607-3

Sánchez-Estrada, A., Fortis-Hernández, M., Vizcarra-Gallegos, E., Galindo-Guzmán, A., Preciado-Rangel, P., & Trejo-Valencia, R. (2026). Biofortification of maize grain with zinc oxide nanoparticles and its relationship with agronomic and phytochemical quality. *Revista de la Facultad De Agronomia de la Universidad del Zulia*, *43*(3). https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v43.n3.X

Sánchez-Pérez, D. M., Márquez-Guerrero, S. Y., Ramírez-Moreno, A., Rodríguez-Sifuentes, L., Galindo-Guzmán, M., Flores-Loyola, E., & Marszalek, J. E. (2023). Impact of biologically and chemically synthesized zinc oxide nanoparticles on seed germination and seedlings' growth. *Horticulturae*, 9(11), 1201. https://doi.org/10.3390/horticulturae9111201

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y alimentación (SAGARPA). (2017). Planeación agrícola Nacional 2017-2030, primera edición. 1-28.

Stanton, C., Sanders, D., Krämer, U., & Podar, D. (2022). Zinc in plants: Integrating homeostasis and biofortification. Molecular Plant, 15(1), 65-85. https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.12.008

Swain, M., Mishra, D., & Sahoo, G. (2025). A review on green synthesis of ZnO nanoparticles. *Discover Applied Sciences*, *7*(9), 997. https://doi.org/10.1007/s42452-025-06957-8

Umar, W., Hameed, M. K., Aziz, T., Maqsood, M. A., Bilal, H. M., & Rasheed, N. (2021). Synthesis, characterization and application of ZnO nanoparticles for improved growth and Zn biofortification in maize. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *67*(9), 1164-1176. https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1782893

Urango, L. A. (2018). Componentes del maíz en la nutrición humana. Fondo Editorial *Biogénesis*, 185-209.

Vera, G., Farías, L., & Castañeda, A. (2017). Síntesis de Nanopartículas Metálicas por Rutas Verdes. Journal of Bioprocess and Chemical Technology. Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila.

Zhang, S., Ji, J., Zhang, S., Xiao, W., Guan, C., Wang, G., & Wang, Y. (2020). Changes in the phenolic compound content and antioxidant activity in developmental maize kernels and expression profiles of phenolic

biosynthesis-related genes. *Journal of Cereal Science*, 96, 103113. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103113

Evaluación morfológica y bioquímica en plántulas de *Solanum lycopersicum* L. con la aplicación de exopolisacáridos de *Porphyridium cruentum*

Elizabeth Garza-Valverde[1]*; Celestino García-Gómez[1]; Juan Luis Morales-Landa[2]; Juanita Guadalupe Gutiérrez-Soto[1]; Guillermo Niño-Medina[1]; Noe Luiz-Santos[2]; José Gerardo Uresti-Porras[1].
[1]Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399.
[2]Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C. Vía de la Innovación #404, Autopista Monterrey-Aeropuerto Km. 10, Parque de Investigación e Innovación Tecnológica PIIT, Apodaca, Nuevo León, México. C.P. 66628.
*Email: elizabeth.garzava@uanl.edu.mx

Resumen. Los exopolisacáridos (EPS) obtenidos de microalgas han mostrado su potencial como bioestimulantes agrícolas. Por lo que el objetivo de este estudio fue medir el efecto de diferentes concentraciones de EPS de *Porphyridium cruentum* sobre la germinación y el crecimiento de plántulas de tomate. Los tratamientos aplicados fueron 1000, 1500 y 2000 mg L^{-1} de EPS, un tratamiento control además de un bioestimulante comercial. Se evaluaron variables como: el porcentaje de imbibición, germinación, índice de velocidad de germinación (IVG), crecimiento morfológico y peso seco. La aplicación de los tratamientos 1000 y 2000 mg L^{-1} incrementaron significativamente la imbibición respecto al control. Igualmente, los tratamientos de 1500 y 2000 mg L^{-1} aumentaron significativamente la longitud y el diámetro del hipocótilo ($p \leq 0.05$). Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en germinación, IVG, longitud de radícula ni peso seco. Estos resultados iniciales muestran que los EPS de *P. cruentum* favorecen algunas características morfológicas de las plántulas de tomate.
Palabras clave. Microalga, tomate, bioestimulante.

Abstract. Exopolysaccharides (EPS) derived from microalgae have demonstrated potential as agricultural biostimulants. Therefore, the objective of this study was to assess the effect of varying concentrations of EPS from *Porphyridium cruentum* on the germination and growth of tomato seedlings. The treatments tested included 1000, 1500, and 2000 mg L^{-1} of EPS, a control group, and a commercial biostimulant. Evaluated variables included the percentage of imbibition, germination, germination rate index (GRI), morphological growth, and dry weight. Application of the 1000 and 2000 mg L^{-1} treatments resulted in a significant increase in imbibition compared to the control. Similarly, the 1500 and 2000 mg L^{-1} treatments significantly increased hypocotyl length and diameter ($p \leq 0.05$). However, no significant differences were observed regarding germination, GRI, radicle length, or dry weight. These preliminary results indicate that EPS from *P. cruentum* promote certain morphological characteristics in tomato seedlings.
Keywords: Microalgae, tomato, biostimulant.

Introducción

Entre los cultivos hortícolas de mayor importancia económica y distribución mundial, se encuentra el tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Garrido-Ruiz *et al*., 2026).

La producción mundial alcanzó 185.28 millones de toneladas en 2023 y aumentó a 188.29 millones de toneladas en 2024. En México, la producción tuvo un incremento de 4.39 a 4.42 millones de toneladas durante el mismo periodo (FAOSTAT, 2026). Debido a las pérdidas durante su producción, cosecha y postcosecha, se ha buscado favorecer el aprovechamiento del fruto y mejorar su conservación antes y después de la cosecha (Akotowanou *et al*., 2022). Una germinación uniforme y un adecuado vigor de las plántulas favorecen el establecimiento exitoso del cultivo y se relacionan directamente con su rendimiento (Cardarelli *et al*., 2022).

La biomasa de microalgas y sus derivados son una fuente potencial de compuestos bioactivos capaces de promover el crecimiento vegetal e incrementar la productividad de los cultivos (Parmar *et al*., 2023). Mediante la aplicación de algas marinas se pueden reducir los efectos generados por el estrés hídrico, al mejorar la eficiencia del uso del agua (Garrido-Ruiz *et al*., 2026). El uso de microalgas promueve la tasa y la velocidad de germinación del tomate, aunque la respuesta depende de la especie de microalga, la fracción y la concentración aplicada (Mollo & Norici, 2025).

Los exopolisacáridos (EPS) son metabolitos producidos por diversos microorganismos. Estos polisacáridos extracelulares son prometedores como compuestos bioactivos naturales para aplicaciones industriales (Cristofoli *et al*., 2023). En la microalga *Porphyridium cruentum*, estos polímeros reemplazan a la pared celular rígida y forman una cubierta mucilaginosa (Havas *et al*., 2026). Los EPS de *P. cruentum* poseen un peso molecular que oscila entre 1.4 x 10^6-1.8 x 10^6 Da. Los monosacáridos que los conforman principalmente son xilosa, galactosa y glucosa, aunque también puede contener ácido glucurónico y arabinosa (Liberti *et al*., 2023).

Los EPS derivados de microalgas han mostrado potencial como elicitores de respuestas de defensa vegetal y como bioestimulantes del crecimiento vegetal (Rachidi *et al*., 2020).

Diversos estudios han demostrado que la aplicación de EPS microbianos reduce los efectos del estrés hídrico y salino (Arroussi *et al*., 2018). La aplicación de EPS podría favorecer la germinación y el crecimiento vegetal, así como modificar diferentes parámetros fisiológicos y bioquímicos (Liu *et al*., 2024). La respuesta fisiológica y morfológica del tomate a los polisacáridos se puede ver influenciada por la concentración y mostrar un comportamiento hormético, donde una concentración óptima estimula el crecimiento, mientras que niveles elevados pueden reducirlos (Li *et al*., 2025).

Por ello, el objetivo de este experimento fue medir el efecto de diferentes concentraciones de EPS de *Porphyridium cruentum* sobre la germinación y el crecimiento de plántulas de *Solanum lycopersicum* L., en comparación con un control sin EPS y un bioestimulante comercial.

Materiales y Métodos

Ubicación de la investigación

La experimentación se realizó en el Laboratorio de Remediación Ambiental y Análisis de Agua, Suelo y Planta de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Cultivo de la microalga

La microalga *P. cruentum* fue cultivada y multiplicada con medio F2 modificado (Guillard & Ryther, 1962). Los cultivos se mantuvieron a 25 ± 2 °C con aireación continua, un fotoperiodo de 12 h y a una intensidad de 180 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$.

Obtención de EPS

El medio de cultivo con microalga *P. cruentum* fue centrifugado a 4000 rpm (Civeq 80-2, Velaquin, China) durante 15 minutos a 25 °C para separar el sobrenadante de la biomasa. Para la obtención de EPS por precipitación alcohólica, el sobrenadante fue mezclado con etanol en una proporción 1:3 (v/v) y almacenado durante 12 h a -20 °C. La muestra fue centrifugada conservando el precipitado, el cual fue liofilizado (LFD-10C, LABOAO, China).

Determinación de carbohidratos de los EPS

Los EPS se disolvieron a una concentración de 16 mg mL^{-1} en agua destilada y después tuvieron un tratamiento de sonicación durante 30 minutos para la solubilización de los componentes. La muestra obtenida se utilizó para la determinación del contenido de carbohidratos mediante el método de Dubois *et al*. (1956). A una muestra de 2 mL colocada en un tubo de ensayo se agregó 1 mL de solución de fenol (5.0%) y 5 mL de ácido sulfúrico (>96%). La absorbancia fue medida a 490 nm utilizando un espectrofotómetro UV-Vis. La curva de calibración fue realizada con D-glucosa con concentraciones de 0, 20, 40, 60, 80 y 100 mg L^{-1} y tuvieron el mismo tratamiento que las muestras, todas las mediciones se realizaron por triplicado.

Material vegetal

Se utilizaron semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*) variedad “Río Grande”, de la casa comercial Kristen Seed.

Tratamientos

Las suspensiones fueron preparadas con EPS en agua destilada y dispersada durante 30 minutos en un sonicador (PS-08A, Eujgoov, China). Las suspensiones fueron diluidas a 1000 mg L^{-1}; 1500 mg L^{-1} y 2000 mg L^{-1}. Los tratamientos aplicados fueron: Control (agua destilada, T1); bioestimulante comercial (T2); 1000 mg L^{-1} (T3); 1500 mg L^{-1} (T4) y 2000 mg L^{-1} (T5). El bioestimulante comercial se preparó según las indicaciones del fabricante a 0.25 % (v/v).

Germinación de semillas y crecimiento de plántulas

Para el experimento fueron utilizados lotes de 50 semillas por tratamiento. Las semillas fueron establecidas en cinco repeticiones de 10 semillas, se utilizaron cajas Petri de plástico de 150 mm de diámetro por 25 mm de altura, las semillas se establecieron sobre papel filtro de 2 µm previamente humedecido. Posteriormente, estas fueron almacenadas a 25 ± 1 °C, con una intensidad de luz de 100 $\mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$ y un fotoperiodo de 12 h durante catorce días, todos los tratamientos fueron establecidos

con las mismas condiciones, la humedad en las cajas Petri se mantuvo con la aplicación de 5 mL de cada tratamiento cada 2 días.

Determinación de la curva de imbibición

La cinética de imbibición de las semillas de tomate se evaluó mediante el método gravimétrico durante 72 h. Para cada tratamiento se utilizaron tres repeticiones de 15 semillas, establecidas en cajas Petri. Inicialmente, las semillas se pesaron en estado seco utilizando una balanza analítica para determinar su masa inicial (m_0). Posteriormente, se colocaron en 12 mL de la solución correspondiente a cada tratamiento. La absorción de agua se evaluó mediante mediciones sucesivas de la masa de las semillas a diferentes intervalos de tiempo (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 24, 36, 48, 60 y 72 h). Antes de cada medición, se retiró cuidadosamente el exceso de humedad superficial y se registró la masa de las semillas (m_t). El porcentaje de imbibición se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$Imbibición\ (\%) = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100$$

Variables evaluadas

Índice de velocidad de germinación (IVG)

Mediante el conteo diario de las semillas germinadas se determinó el índice de velocidad de germinación durante el periodo experimental. Se consideró como semilla germinada aquella que presentó protrusión visible de la radícula. El IVG se calculó de acuerdo con la ecuación propuesta por Maguire (1962):

$$IVG = \sum_{i=1}^{n} \frac{G_i}{T_i}$$

Donde G_i corresponde al número de semillas recién germinadas en el día *i*, T_i es el tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo hasta el día *i* expresado en días y *n* es el número total de evaluaciones realizadas.

Porcentaje de germinación (G%)

El conteo total de plántulas fue realizado el día catorce después del establecimiento, donde se consideraron el total de semillas germinadas y el resultado fue expresado como porcentaje.

$$G\% = \frac{(\ semillas\ germinadas)}{(semillas\ incubadas)}(100)$$

Crecimiento y biomasa

Evaluación de las longitudes de las plántulas

A los 14 días después del establecimiento del ensayo de germinación, fueron determinadas las longitudes de la raíz primaria, el hipocótilo y el diámetro. La longitud de la raíz primaria se midió desde la unión raíz-hipocótilo hasta el ápice de la raíz principal, mientras que la longitud del hipocótilo se determinó desde dicha unión hasta el punto de inserción de los cotiledones. El diámetro del hipocótilo se midió en el punto más alto. Las mediciones se realizaron en tres plántulas por unidad experimental, se utilizó un vernier digital, y los resultados se expresaron en milímetros (mm).

Peso seco

El peso seco se determinó separando las plántulas en raíz y parte aérea. Posteriormente, se sometieron a secado a 50°C por 24 horas y cuando alcanzaron peso constante se pesaron mediante una balanza analítica. El peso seco de cada

fracción se dividió entre el número de plántulas evaluadas (n=10), los resultados se expresaron en mg/plántula.

Diseño experimental y análisis estadístico.

El experimento se realizó bajo un diseño experimental completamente al azar. Para el ensayo de germinación y crecimiento se utilizaron cinco repeticiones de 10 semillas por tratamiento, mientras que para el ensayo de imbibición se emplearon tres repeticiones de 15 semillas. Para cada repetición se utilizó una caja Petri separada que se consideró como unidad experimental. El modelo lineal general fue $Y_{ij}=\mu+\alpha_i+e_i$; donde Y_{ij}=variable respuesta; μ=media global; α_i= efecto del tratamiento; e_{ij}= error experimental. La diferencia estadísticamente significativa entre las muestras se analizó con un ANOVA de una vía y las medias de los tratamientos fueron comparadas por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), utilizando el paquete estadístico Minitab versión 17.0 (Pensilvania, PA, USA). Los resultados se reportaron como valores medios de cinco muestras ± desviación estándar.

Resultados y Discusión

Contenido de carbohidratos de los EPS

El contenido de carbohidratos totales en los EPS de *Porphyridium cruentum* fue de 15.06 ± 0.94 mg g^{-1} (Cuadro 1). Lo cual muestra el contenido de carbohidratos presentes en los EPS obtenidos por precipitación alcohólica.

Cuadro 1. Contenido de carbohidratos totales en los EPS.

Muestra	Carbohidratos totales (mg L^{-1})
EPS	233.72 ± 48.10

Los resultados se expresan como media ± desviación estándar (n=5).

La producción de EPS obtenida fue de 233.72 ± 48.10 mg L^{-1}, un valor cercano a lo reportado por Liberti *et al*., (2023), quienes obtuvieron un rendimiento de 300 ± 67 mg L^{-1}. Aunque la concentración fue menor a lo reportado, las diferencias podrían relacionarse a las condiciones del cultivo, tamaño del reactor, características de la cepa y el procedimiento de recuperación del sobrenadante.

Curva de imbibición de semillas de tomate

La imbibición de las semillas de tomate mostró un incremento durante las primeras 12 horas de evaluación en todos los tratamientos, alcanzando valores aproximados de entre 70 y 90 % (Figura 1). Posteriormente, entre las 12 y 48 horas, se mostró una estabilización, seguida de un incremento en las últimas 24 horas, especialmente en los tratamientos con EPS. Los resultados mostraron que los tratamientos con 1000 y 2000 mg L^{-1} de EPS presentaron porcentajes de imbibición significativamente superiores al control, al bioestimulante comercial y al tratamiento con 1500 mg L^{-1} ($p \leq 0.05$) después de 72 horas de evaluación. Las semillas tratadas con 2000 y 1000 mg L^{-1} de EPS registraron los mayores porcentajes de imbibición, con valores de 148.42 ± 3.62 % y 137.21 ± 3.68 %, respectivamente, equivalentes a incrementos del 48.85 y 37.61 % en comparación con el control, sin diferencias significativas entre ambas concentraciones (Cuadro 2). Por otra parte, el tratamiento con 1500 mg L^{-1} de EPS presentó un porcentaje de imbibición de 120.24 ± 2.11 %, sin diferencias significativas respecto al bioestimulante comercial (112.37 ± 4.00 %), aunque ambos tratamientos fueron significativamente superiores al control.

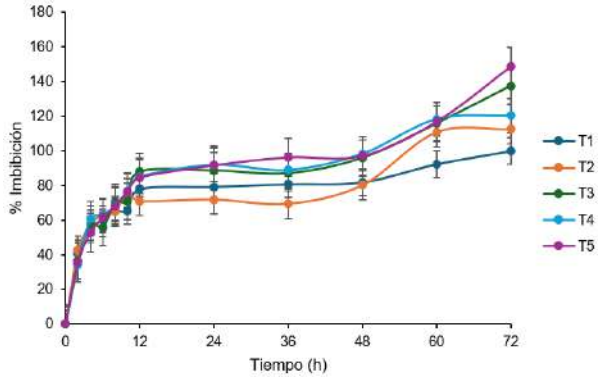


Figura 1. Cinética de imbibición de semillas de tomate durante 72 horas. T1: control (agua destilada); T2: bioestimulante comercial; T3: 1000 mg L^{-1} de EPS; T4: 1500 mg L^{-1} de EPS y T5: 2000 mg L^{-1} de EPS.

Cuadro 2. Comparación del porcentaje de imbibición de semillas de tomate después de 72 horas.

Tratamiento	Imbibición (%)
T1	99.71 ± 7.95^{c}
T2	112.37 ± 4.00^{b}
T3	137.21 ± 3.68^{a}
T4	120.24 ± 2.11^{b}
T5	148.42 ± 3.62^{a}

T1: control (agua destilada); T2: bioestimulante comercial; T3: 1000 mg L^{-1} de EPS; T4: 1500 mg L^{-1} de EPS y T5: 2000 mg L^{-1} de EPS. Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 3). Superíndice con letras diferentes indica diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$).

La aplicación de EPS modificó la dinámica de imbibición de las semillas de tomate. Este comportamiento podría relacionarse con la naturaleza hidrofílica de los EPS, cuya capacidad de retención de agua puede influir en la hidratación de las semillas (Dai *et al*., 2024). Asimismo, el incremento en la absorción de agua podría contribuir al ablandamiento de la cubierta de la semilla para favorecer las condiciones adecuadas para la protrusión de la radícula y el crecimiento de la plántula (Elhakim *et al*., 2026).

Germinación y vigor

En la Figura 2 se muestran las características morfológicas de las plántulas de tomate con diferentes concentraciones de EPS.

El porcentaje de germinación e IVG se muestran en el Cuadro 3. Los resultados obtenidos no muestran diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para ninguna de las variables evaluadas ($p > 0.05$), lo que indica que no se presentó un efecto de las concentraciones evaluadas sobre estas variables bajo las condiciones experimentales del estudio. En estudios con semillas de tomate tratadas con extractos de microalgas se ha encontrado hasta un 25% de porcentaje de germinación superior que aquellas tratadas con agua destilada (Alling *et al*., 2023). Otros estudios han reportado que ciertos compuestos de microalgas pueden favorecer la velocidad de germinación mediante la estimulación de la actividad enzimática. También se ha asociado con el incremento de la actividad amilásica y la aceleración del metabolismo de las semillas (Mzibra *et al*., 2021). Sin embargo, estos hallazgos no se reprodujeron significativamente en esta investigación.

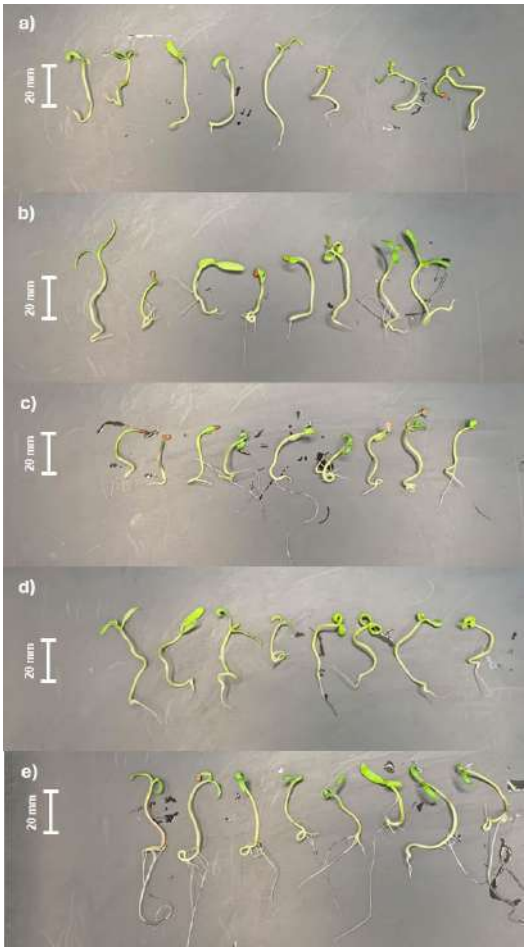


Figura 2. Efecto de diferentes concentraciones de EPS de *Porphyridium cruentum* sobre el desarrollo morfológico de plántulas de tomate. Se muestran plántulas representativas de los tratamientos evaluados: a) control (agua destilada); b) bioestimulante comercial; c) 1000 mg L^{-1} de EPS; d) 1500 mg L^{-1} de EPS y e) 2000 mg L^{-1} de EPS.

Cuadro 3. Efecto de los EPS sobre la germinación y el índice de velocidad de germinación de semillas de tomate.

Tratamiento	% Germinación	IVG
T1	86.00 ± 13.56[a]	3.61 ± 0.22[a]
T2	86.00 ± 8.00[a]	4.04 ± 0.28[a]
T3	64.00 ± 21.54[a]	4.59 ± 0.32[a]
T4	62.00 ± 13.27[a]	3.96 ± 0.53[a]
T5	86.00 ± 11.40[a]	4.66 ± 0.90[a]

IVG: Índice de Velocidad de Germinación. T1: control (agua destilada); T2: bioestimulante comercial; T3: 1000 mg L^{-1} de EPS; T4: 1500 mg L^{-1} de EPS y T5: 2000 mg L^{-1} de EPS. Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 5). Superíndice con letras iguales indica que no hay diferencia estadística significativa ($p > 0.05$).

Crecimiento y biomasa

El Cuadro 4 muestra los resultados del crecimiento y desarrollo de las plántulas de tomate. La longitud de la radícula no mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p > 0.05$). Por otro lado, la longitud del hipocótilo y el diámetro de este presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p \leq 0.05$). Los valores más elevados para la longitud del hipocótilo se observaron en el T5 y T4, con 35.41 ± 8.34 mm y 33.70 ± 10.92 mm, respectivamente, los cuales fueron significativamente superiores al T1 y T3, mientras que el bioestimulante comercial tuvo un valor intermedio, sin diferencias significativas respecto a los demás tratamientos. De la misma manera, el diámetro del tallo mostró diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$), donde T4 y T5 tuvieron los valores más altos, 1.09 ± 0.25 mm y 1.07 ± 0.22 mm, respectivamente. Ambos tratamientos fueron estadísticamente superiores a T1 (0.76 ± 0.17 mm), T2 (0.73 ± 0.07 mm) y T3 (0.71 ± 0.15 mm).

Los resultados en la longitud de radícula y la ausencia de diferencias significativas son similares a lo reportado por Rachidi ***et al***. (2020), quienes observaron que al aplicar polisacáridos de *Porphyridium* sp. a concentraciones de 500 y 1000 mg L^{-1} no modificó significativamente la longitud de raíz en plantas de tomate. Sin embargo, se encontraron incrementos significativos en la longitud de la parte aérea a dichas concentraciones. Los resultados obtenidos en este experimento mostraron incrementos significativos en la longitud del hipocótilo en concentraciones de 1500 y 2000 mg L^{-1}, lo que podría relacionarse con las diferentes

características de los polisacáridos, la etapa de desarrollo vegetal y las condiciones experimentales.

El aumento en el diámetro del tallo concuerda con lo reportado en un estudio sobre la aplicación de bioestimulantes oligosacarídicos en plántulas de tomate, donde se observaron incrementos significativos del diámetro del 18 y 20% mediante la aplicación de dos formulaciones comerciales, esta respuesta estuvo acompañada de incrementos en el contenido de clorofila y la actividad fotosintética, lo que sugiere una posible relación entre la aplicación de bioestimulantes y la regulación de procesos relacionados con el crecimiento vegetal (Zhang *et al*., 2026).

Cuadro 4. Efecto de los EPS sobre el crecimiento y desarrollo morfológico de plántulas de tomate.

Tratamiento	Longitud de radícula (mm)	Longitud de hipocótilo (mm)	Diámetro de tallo (mm)
T1	13.88 ± 3.76^{a}	21.67 ± 5.72^{b}	0.76 ± 0.17^{b}
T2	14.46 ± 7.36^{a}	28.77 ± 6.70^{ab}	0.73 ± 0.07^{b}
T3	12.36 ± 3.13^{a}	19.98 ± 4.50^{b}	0.71 ± 0.15^{b}
T4	19.16 ± 7.14^{a}	33.70 ± 10.92^{a}	1.09 ± 0.25^{a}
T5	18.64 ± 7.47^{a}	35.41 ± 8.34^{a}	1.07 ± 0.22^{a}

T1: control (agua destilada); T2: bioestimulante comercial; T3: 1000 mg L^{-1} de EPS; T4: 1500 mg L^{-1} de EPS y T5: 2000 mg L^{-1} de EPS. Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 5). Superíndice con letras diferentes indica diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$).

Peso seco

Las plántulas de tomate no presentaron diferencias estadísticamente significativas en el peso seco entre los tratamientos ($p > 0.05$) (Cuadro 5). Sin embargo, los resultados mostraron diferencias numéricas, donde los mayores valores de peso seco de parte aérea y raíz corresponden al T5 que posee la mayor concentración de EPS. Estos resultados coinciden con Rachidi *et al.* (2020), quienes tuvieron un incremento significativo en el peso seco de la parte aérea con respecto al control al aplicar EPS de *P. cruentum*, aunque no hubo diferencia en la raíz para ese estudio.

Cuadro 5. Efecto de los EPS sobre el contenido de peso seco (PS) en tomate.

Tratamiento	PS parte aérea (mg/plántula)	PS raíz (mg/plántula)
T1	1.41 ± 0.47^{a}	0.37 ± 0.16^{a}
T2	1.27 ± 0.27^{a}	0.52 ± 0.17^{a}
T3	1.90 ± 0.50^{a}	0.65 ± 0.53^{a}
T4	1.85 ± 0.28^{a}	0.61 ± 0.09^{a}
T5	1.92 ± 0.47^{a}	0.81 ± 0.30^{a}

T1: control (agua destilada); T2: bioestimulante comercial; T3: 1000 mg L^{-1} de EPS; T4: 1500 mg L^{-1} de EPS y T5: 2000 mg L^{-1} de EPS. Los valores se expresan como media ± desviación estándar (n = 5). Superíndice con letras diferentes indica diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$).

Conclusiones

La aplicación de EPS de microalgas mostró efectos favorables en la imbibición y el crecimiento de plántulas de tomate. Los tratamientos con 1000 y 2000 mg L^{-1} de EPS aumentaron de manera significativa la absorción de agua durante las primeras 72 horas. Por otro lado, los tratamientos con 1500 y 2000 mg L^{-1} de EPS influyeron positivamente en la longitud y el diámetro del hipocótilo. Esto sugiere que el efecto de los EPS como bioestimulante depende de la

concentración aplicada además de la variable evaluada, lo que respalda el potencial de EPS como bioestimulante en la germinación y crecimiento de plántulas en el cultivo de tomate.

Agradecimientos

A la SECIHTI, la UANL, la Facultad de Agronomía y al CIATEJ por las facilidades otorgadas y el uso de sus instalaciones.

Referencias Bibliográficas

Alling, T., Funk, C., & Gentili, F. (2023). Nordic microalgae produce biostimulant for the germination of tomato and barley seeds. Scientific Reports 13:3509.

Akotowanou, O. C. A., Adjou, E. S., Olubi, A. B., Kougblenou, S. D., Ahoussi, E. D., & Sohounhloué, D. C. (2022). The tomato (*Solanum lycopersicum* L.) in community development: An overview focused on nutritional properties, agronomic constraints, recent achievements and future prospective. International Journal of Frontiers in Biology and Pharmacy Research, 03(02), 008–016.

Arroussi, E. H., Elbaouchi, A., Sijilmassi, B., Mernissi, E. N., Aafsar, A., & Meftah-Kadmiri, I. (2018). *Dunaliella salina* exopolysaccharides: a promising biostimulant for salt stress tolerance in tomato (*Solanum lycopersicum*). Journal of Applied Phycology, 30, 2929-2941.

Cardarelli, M., Woo, S. L., Rouphael, Y., & Colla, G. (2022). Seed Treatments with Microorganisms Can Have a Biostimulant Effect by Influencing Germination and Seedling Growth of Crops. Plants, 11(259).

Cristofoli, N. L., Lima, A. R., Da Costa, A. R. M., Evtyugin, D. D., Silva, C., Varela, J., & Vieira, M. (2023). Structural characterization of exopolysaccharides obtained from *Porphyridium cruentum* exhausted culture medium. Food and Bioproducts Processing. 138, 162–171.

Dai, Y., Xu, M., Zhou, Z. & Han, Y. (2024). Evaluate the structural and physicochemical properties of exopolysaccharides produced by Bacillus halotolerans isolated from locally sourced vegetables. Polymers, 16, 759

Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J. K., Rebers, P.A. & F. Smith. (1956). Colorimetric method for determination of sugars and related substances. Anal. Chem. 28. 350-356.

Elhakim, K. O. & Ahmed, E. Z. (2026). Agronomic evaluation of microalgal extracts as seed biostimulants for improving germination and early growth of common bean. Scientific Reports, 16.

García-López, J. I., Zavala-García, F., Olivares-Sáenz, E., Lira-Saldívar, R. H., Díaz Barriga-Castro, E., Ruiz-Torres, N. A., Ramos-Cortez, E., Vázquez-Alvarado, R. & Niño-Medina, G. (2018). Zinc Oxide Nanoparticles Boosts Phenolic Compounds and Antioxidant Activity of *Capsicum annuum* L. during Germination. Agronomy. 8(10), 215.

Garrido-Ruiz, C., Frisby, J., Kaundal, A., Sun, Y.-P., & De Oliveira, M. M. T. (2026). Screening Biostimulants to Enhance Early Growth of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Under Water-Limited Conditions. Horticulturae, 12(432).

Guillard, R. & Ryther, J. H. (1962). Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella nana Hustedt*, and *Detonula confervacea* (cleve) Gran. Candian Journal of Microbiology, 8 (2), 229-239.

Havas, F., Krispin, S., Cohen, M., & Attia-Vigneau, J. (2026). Hyaluronic Acid-like Skin Plumping and Radiance Benefits of a Porphyridium Sulfated Exopolysaccharide- and Natural PDRN-Rich Extract. Marine Drugs, 24, 99.

Li, Y., Wang, J., Fan, K., Guo, L., Hou, L., Miao, Y.-X., Sun, M., Li, Y.-L., & Bai, L. (2025). Alginate Oligosaccharide Coordinately Modulates Endogenous Phytohormone Profiles to Enhance Tomato Growth. Horticulturae. 11(580).

Liberti, D., Imbimbo, P., Giustino, E., D'Elia, L., Ferraro, G., Casillo, A., Illiano, A., Pinto, G., Di Meo, M. C., Álvarez-Rivera, G., Corsaro, M. M., Amoresano, A., Zarrelli, A., Ibáñez, E., Merlino, A., & Monti, D. (2022). Inside out *Porphyridium cruentum*: Beyond the Conventional Biorefinery Concept. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 11*, 381 - 389.

Liberti, D., Imbimbo, P., Giustino, E., D'Elia, L., Silva, M., Barreira, L., & Monti, D. (2023). Shedding Light on the Hidden Benefit of Porphyridium cruentum Culture. Antioxidants, 12.

Liu, X., & Yao, T. (2024). Types, synthesis pathways, purification, characterization, and agroecological physiological functions of microbial exopolysaccharides: A review. International journal of biological macromolecules. 281(3).

Maguire, J. D. (1962). Speed of germination—Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. Crop Science, 2(2), 176–177.

Mollo, L., & Norici, A. (2025). Biostimulant potential of three Chlorophyta and their consortium: application on tomato seeds. Discover Plants, 2(130).

Mzibra, A., Aasfar, A., Benhima, R., Khouloud, M., Boulif, R., Douira, A., Bamouh, A., & Kadmiri, I. M. (2020). Biostimulants Derived from Moroccan Seaweeds: Seed Germination Metabolomics and Growth Promotion of Tomato Plant. *Journal of Plant Growth Regulation, 40*, 353-370.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2025, 31 de diciembre). *FAOSTAT: Cultivos y productos de ganadería*. FAOSTAT. Recuperado el 1 de noviembre de 2026 de https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL

Parmar, P., Kumar, R., Neha, Y., & Srivatsan, V. (2023). Microalgae as next generation plant growth additives: Functions, applications, challenges and circular bioeconomy

based solutions. Frontiers in Plant Science, 14.

Rachidi, F., Benhima, R., Sbabou, L., & Arroussi, E. H. (2020). Microalgae polysaccharides bio-stimulating effect on tomato plants: Growth and metabolic distribution. Biotechnology Reports. 25, e00426.

Singleton, V. L. & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. American Journal of Enology and Viticulture. 16(3), 144–158.

Zhang, J.-L., He, B.-Q., Cai, L.-W., Lei, X.-T., Yan, G.-F., Tang, J., Zhao, B., & Guo, Y.-D. (2026). Effects of Two Oligosaccharide Biostimulants on Growth, Physiological Traits and Hormone Levels in Tomato Seedlings. *Agronomy*.

Etiología de cancros en troncos y ramas de árboles de aguacate en cuatro zonas productoras de México

Karen Guadalupe Cantú-Treviño[1*]; Adriana Gutiérrez-Díez[1]; Salvador Ochoa-Ascencio[2]; Alejandro Ibarra-López[1]; Francisco Zavala-García[1]; Netzahualcóyotl Mayek-Pérez[3].
[1]Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Agronomía. Francisco Villa S/N Col. Ex Hacienda El Canadá, Gral. Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399.
[2]Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Facultad de Agrobiología "Presidente Juárez". Paseo Lázaro Cárdenas 2290, Emiliano Zapata, Melchor Ocampo, Uruapan, Michoacán, México. C.P. 60170
[3]Instituto Politécnico Nacional. Centro de Biotecnología Genómica. Blvd del Maestro SN, Narciso Mendoza, Reynosa, Tamaulipas. C.P. 88710.
*Email: karen.cantutrv@uanl.edu.mx

Resumen. Los cancros en troncos y ramas del aguacatero son lesiones asociadas a hongos fitopatógenos que ocasionan necrosis en tejidos leñosos. El objetivo de esta investigación fue identificar los hongos asociados a cancros en árboles de aguacate de cuatro regiones productoras de México. En 2023 se colectaron muestras de madera con síntomas de cancro en huertas de aguacate criollo (*Persea americana* var. *drymifolia*) en Nuevo León, y de aguacate Hass en Jalisco, Nayarit y Michoacán. Se obtuvieron 50 aislados fúngicos: 26 de Nuevo León, nueve de Michoacán, ocho de Jalisco y siete de Nayarit. Los aislados fueron purificados, evaluados mediante pruebas de patogenicidad y caracterizados morfológica y molecularmente mediante secuenciación de las regiones ITS, TEF1-α y β-tubulina. Se identificaron 16 especies asociadas a diez géneros: *Pleurostoma*, *Lasiodiplodia*, *Neopestalotiopsis*, *Pestalotiopsis*, *Neofusicoccum*, *Botryosphaeria*, *Fusarium*, *Geosmithia*, *Colletotrichum* y *Cytospora*. Todos los aislados indujeron síntomas de cancro en aguacate. *Pleurostoma* y *Fusarium* fueron los géneros más frecuentes, mientras que *Fusarium* y *Neopestalotiopsis* presentaron la distribución geográfica más amplia. Los resultados evidenciaron diferencias regionales en la composición de hongos, confirmando que los cancros del aguacatero en México están asociados a un complejo diverso de hongos fitopatógenos. Estos hallazgos amplían el conocimiento sobre su etiología y contribuyen al desarrollo de estrategias de manejo fitosanitario.
Palabras clave. *Botryosphaeriaceae*, *Nectriaceae*, *Persea americana*.

Abstract. Cankers on avocado trunks and branches are lesions associated with phytopathogenic fungi that cause necrosis in woody tissues. This study aimed to identify the fungi associated with cankers in avocado trees from four avocado-producing regions of Mexico. In 2023, wood samples showing canker symptoms were collected from orchards of Mexican native avocado (*Persea americana* var. *drymifolia*) in Nuevo León and Hass avocado in Jalisco, Nayarit, and Michoacán. Fifty fungal isolates were obtained: 26 from Nuevo León, nine from Michoacán, eight from Jalisco, and seven from Nayarit. The isolates were purified, evaluated through pathogenicity tests, and characterized morphologically and molecularly by sequencing the ITS, TEF1-α, and β-tubulin regions. Sixteen species belonging to ten genera were identified: Pleurostoma, *Lasiodiplodia, Neopestalotiopsis, Pestalotiopsis, Neofusicoccum, Botryosphaeria, Fusarium, Geosmithia, Colletotrichum*, and *Cytospora*. All isolates induced canker symptoms in avocado. *Pleurostoma* and *Fusarium* were the most frequent genera, whereas *Fusarium* and *Neopestalotiopsis* showed the widest

geographical distribution. The results revealed regional differences in fungal composition, confirming that avocado cankers in Mexico are associated with a diverse complex of phytopathogenic fungi. These findings expand our understanding of the etiology of avocado cankers and contribute to the development of plant disease management strategies.
Palabras clave. *Botryosphaeriaceae*, *Nectriaceae*, *Persea americana*.

Introducción

El cultivo de aguacate (*Persea americana* Mill.) constituye uno de los sistemas frutícolas de mayor relevancia económica a nivel mundial; la producción, sanidad y longevidad se ven afectadas debido a que el cultivo es afectado por diversas enfermedades de la madera que representan un problema fitosanitario de importancia creciente en sus diferentes etapas de desarrollo (Díaz *et al*., 2016). Las enfermedades de la madera comprometen los órganos estructurales de la planta como el tronco, las ramas, así como el sistema vascular, provocando síntomas como necrosis, producción de exudados, cancros y muerte regresiva, por otro lado, han sido asociadas a complejos fúngicos en los que intervienen diferentes especies de hongos con la capacidad de colonizar los tejidos vasculares (Fontaine *et al*., 2025; Martino *et al*., 2025).

Diversos estudios han reportado que la diversidad de patógenos fúngicos asociados a estas enfermedades incluye microorganismos primarios, oportunistas y patógenos latentes permitiendo su activación bajo condiciones de estrés ambiental, fisiológico o nutricional lo que incrementa la severidad de la sintomatología y progreso de los daños en los árboles (Slippers y Wingfield, 2007; Gramaje *et al*., 2018).

La familia *Botryosphaeriaceae* que pertenece al orden *Botryosphaeriales* dentro de los hongos ascomicetos, ha sido asociada y reconocida por su relevancia fitopatológica en frutales y especies forestales. Los miembros de esta familia presentan amplia distribución geográfica, gran diversidad genética y amplio rango de hospedantes. Géneros como *Lasiodiplodia, Neofusicoccum* y *Botryosphaeria* han sido asociados a pudrición del pedúnculo de los frutos de aguacate en postcosecha, cancros y muerte regresiva de las ramas. Las plantas afectadas por miembros de esta familia presentan marchitamiento de hojas y muerte regresiva, clorosis foliar y decoloración en los conductos del xilema (Phillips *et al*., 2013; Slippers *et al*., 2017; Olmo *et al*., 2016). La determinación de las especies de hongos fitopatógenos causantes de los cancros contribuye en la elaboración de un programa de manejo integrado que permita minimizar el impacto de la enfermedad en la vida útil del árbol.

Objetivo general. Identificar los hongos causantes de cancros de tronco y ramas del aguacatero en cuatro zonas productoras de México

Objetivos específicos.

a) Determinar la patogenicidad de hongos aislados de cancros de troncos y ramas de árboles de aguacate var. *drymifolia* de Nuevo León.

b) Determinar la patogenicidad de hongos obtenidos de cancros de troncos y ramas de árboles de aguacate variedad Hass provenientes de Jalisco, Nayarit y Michoacán.
c) Caracterizar morfológica y molecularmente los aislados fúngicos obtenidos de cancros de árboles de aguacate de Nuevo León, Jalisco, Nayarit y Michoacán.
d) Evaluar *in vitro* la sensibilidad de los aislados fúngicos a fungicidas de diferentes grupos químicos.

Materiales y Métodos

a) Área de estudio, aislamiento y purificación de aislados.

Árboles de aguacate con síntomas de cancros en troncos y/o ramas fueron detectados mediante recorridos en huertas de Jalisco, Nayarit, Michoacán y Nuevo León. Las muestras fueron obtenidas de cancros de troncos y ramas. Previo a su establecimiento *in vitro* para la obtención de los aislados, estas fueron desinfectadas en tubos de 5 mL con 2 mL de hipoclorito de sodio al 2 % durante 1 minuto seguido de tres enjuagues con agua bidestilada estéril, posteriormente se realizaron cortes para obtener un fragmento de la parte central de la muestra para su establecimiento en placas Petri con medio de cultivo PDA adicionado con ácido tartárico al 10 % (14 mL/L). Las placas Petri fueron incubadas a 25 °C durante 72 h en oscuridad para el crecimiento de los hongos, se realizó el aislamiento de los hongos en placas nuevas con medio PDA y fueron incubadas a 25 °C hasta la producción de esporas. La purificación de los aislados se llevó a cabo mediante cultivo monospórico. Las esporas germinadas fueron observadas y seleccionadas con ayuda de un microscopio y transferidas con una aguja a una placa Petri nueva con medio PDA.

b) Pruebas de patogenicidad.

Los hongos obtenidos una vez purificados fueron evaluados en su patogenicidad para establecer su relación con los síntomas de cancros de troncos y ramas mediante la aplicación de los postulados de Koch (Agrios, 2005). Las pruebas de patogenicidad se realizaron por medio de la inoculación de discos de micelio de 5 mm con crecimiento activo de cada uno de los hongos en ramas jóvenes y sanas de árboles de aguacate. Los resultados de las inoculaciones fueron evaluadas a los 14 días de su establecimiento en cámaras húmedas y oscuridad. Una vez reproducidos los síntomas, se realizó el reaislamiento del patógeno en PDA a partir del tejido necrótico de las ramas previamente infectadas.

c) Caracterización morfológica y molecular.

Los aislados purificados fueron sembrados en placas Petri con medio PDA e incubados a 25 °C en oscuridad durante 30 días. La comparación de las características microscópicas (micelio y esporas) y macroscópicas (diámetro, color y textura) de las colonias purificadas se realizó tomando como referencia los estudios de Phillips *et al*. (2013) y Lombard *et al*. (2015). Para la caracterización molecular se realizó extracción de ADN total de acuerdo con lo propuesto por Cenis (1992), la integridad del ADN fue revisada mediante electroforesis en gel de agarosa al 0.8 %. La cuantificación y evaluación de la pureza del

ADN se realizó mediante espectrofotometría utilizando un NanoDrop 2000 (Thermo Scientific), empleando la relación de absorbancia 260/280 como criterio para estimar la presencia de contaminantes.

La identificación se realizó por medio de la amplificación de las regiones génicas ITS (región espaciadora transcrita interna del ADN ribosomal, Tub2 (b-tubulina) y TEF1-α (factor de elongación de traducción 1-alfa) mediante la reacción en cadena de la polimerasa (PCR). Para cada región se utilizaron los iniciadores específicos indicados en el Cuadro 1. La mezcla de reacción de PCR se preparó a un volumen de 12.5 µl, la composición de la mezcla de reacción se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Iniciadores utilizados para la amplificación de la región ITS, TEF 1-α y TUB2 para la identificación molecular de los aislados fúngicos obtenidos de cancros de árboles de aguacate.

Región	Iniciadores (5´-3´)	Referencias
ITS	ITS1 (TCCGTAGGTGAACCTGCGG) ITS4 (TCCTCCGCTTATTGATATGC)	White *et al.,* 1990
TEF1- α	EF1-728F (CGGTCACTTGATCTACAAGTGC) EF1-986R (CCTCGAACTCACCAGTACCG)	Glass y Donaldson, 1995
Tub2	Bt2a (GGTAACCAAATCGGTGCTGCTTTC) Bt2b (ACCCTCAGTGTAGTGACCCTTGGC)	Glass y Donaldson, 1995;

El programa térmico utilizado consistió en un ciclo inicial de desnaturalización a 94 °C por 5 minutos; 35 ciclos de desnaturalización a 94 °C por 30 s, alineación a 54-60 °C por 30 s, extensión a 72 °C por 90 s; y un ciclo de extensión final a 72 °C durante 5 minutos. Los productos de PCR fueron visualizados por electroforesis en gel de agarosa al 1 % en buffer TBE 1X, utilizando el marcador de peso molecular Promega® DNA Ladder 1 Kb, los fragmentos amplificados se enviaron a secuenciar a Macrogen (Seoul, Korea). Las secuencias resultantes fueron editadas y comparadas con la base de datos NCBI (National Center for Biotechnology Information), utilizando el software Blast (Basic Local Alignment Search Tool).

Cuadro 2. Composición de la mezcla de reacción de PCR y concentración final de los reactivos para la generación de ITS.

Componente	Concentración final
ADN total	20 ng
$MgCl_2$	2.5 mM
Buffer *Taq* polimerasa	1X
dNTP mix	0.02 mM
Iniciador F	0.2 pmol/µl
Iniciador R	0.2 pmol/µl
Taq polimerasa	0.35 U
dH_2O	---

d) Análisis filogenético.

Las secuencias resultantes de las regiones ITS, TEF1-α y Tub2 fueron alineadas de manera independiente con secuencias de referencia obtenidas del GenBank. Los alineamientos por región se realizaron en MAFFT v7 (Katoh y Standley, 2013) utilizando los parámetros predeterminados.

Las secuencias alineadas fueron recortadas de manera manual en Mega X (Kumar *et al*., 2018), posteriormente las matrices se concatenaron en Mesquite v3.70 (Madison y Madison, 2021) para generar una secuencia consenso multilocus (ITS + TEF1-α + Tub2). El análisis filogenético se realizó en IQ-TREE v2.2.2 (Minh *et al*., 2020) utilizando la opción automática del modelo de sustitución más adecuado mediante ModelFinder y el método de Máxima Verosimilitud. La solidez de las ramas se evaluó mediante 1000 réplicas de Bootstrap ultrarrápido. El árbol resultante se visualizó y editó en FigTree v1.4.5 (Rambaut, 2018).

Resultados y discusión

A partir de las muestras colectadas de árboles de aguacate con síntomas de cancro se obtuvieron 50 aislados fúngicos distribuidos en las cuatro regiones productoras evaluadas. Nuevo León presentó el mayor número de aislados (26), seguido de Michoacán (9), Jalisco (8) y Nayarit (7). Las pruebas de patogenicidad realizadas en ramas de aguacate demostraron que todos los aislados fueron capaces de inducir síntomas de cancro. Asimismo, el reaislamiento de los hongos a partir del tejido necrótico permitió corroborar su patogenicidad mediante los postulados de Koch. Estos resultados evidencian la participación de diversos hongos en el desarrollo de cancros en troncos y ramas del aguacatero.

La caracterización morfológica permitió identificar los aislados a nivel de género, mientras que el análisis filogenético multilocus de las regiones ITS, TEF1-α y β-tubulina complementó la identificación a nivel de especie para los géneros *Lasiodiplodia, Botryosphaeria, Neofusicoccum, Pestalotiopsis, Neopestalotiopsis* y *Pleurostoma*. Además, se obtuvieron aislados identificados a nivel de género correspondientes a *Fusarium*, *Geosmithia*, *Colletotrichum* y *Cytospora*. Las especies identificadas fueron: *Botryosphaeria dothidea; Lasiodiplodia citricola, L. iraniensis, L. pontae, L. subglobosa* y *L. macrospora; Neofusicoccum arbuti, N. nonquaesitum* y *N. parvum; Pestalotiopsis clavispora y P. australiaseae; Neopestalotiopsis honoluluana, N. olumideae, N. rosae y N. surinamensis;* y *Pleurostoma richardsiae*.

El uso combinado de la caracterización morfológica y el análisis filogenético multilocus permitió mejorar la resolución taxonómica de los aislados. Este enfoque coincide con el empleado por McDonald y Eskalen (2011), quienes utilizaron las regiones ITS y β-tubulina para identificar especies de *Botryosphaeriaceae*, y por Valencia *et al*. (2019), quienes combinaron análisis morfológicos y filogenéticos de ITS y TEF1-α para identificar hongos asociados con cancro y muerte regresiva en aguacate. En conjunto, los resultados demuestran que los cancros del aguacatero en las cuatro regiones productoras estudiadas están asociados con una diversidad de hongos fitopatógenos, cuya composición varía geográficamente.

La diversidad de hongos identificada coincide con estudios previos sobre la asociación de múltiples especies fúngicas con los cancros y la muerte regresiva del aguacatero, principalmente integrantes de

la familia *Botryosphaeriaceae* (McDonald y Eskalen, 2011; Valencia *et al*., 2019). En California, McDonald y Eskalen (2011) identificaron seis especies de esta familia asociadas con cancros de ramas, mientras que, en Chile, Valencia *et al*. (2019) reportaron ocho especies en árboles con cancro y muerte regresiva. En el presente estudio, la identificación de *Lasiodiplodia*, *Neofusicoccum* y *Botryosphaeria* reafirma la importancia de los miembros de la familia *Botryosphaeriaceae* entre los hongos asociados a cancros en tejidos leñosos del aguacate. Asimismo, estudios previos han demostrado la capacidad de especies de *Neofusicoccum* y *Lasiodiplodia* para inducir necrosis en aguacate mediante pruebas de patogenicidad (McDonald y Eskalen, 2011; Valencia *et al*., 2019).

La identificación permitió establecer diferencias en la composición de hongos entre las regiones evaluadas. Nuevo León presentó la mayor diversidad de géneros con ocho, seguido de Michoacán con cinco, mientras que Jalisco y Nayarit presentaron cuatro cada uno. *Fusarium* y *Neopestalotiopsis* se registraron en las cuatro regiones, lo que evidencia su amplia distribución geográfica dentro del área de estudio. En contraste, *Pleurostoma*, *Colletotrichum* y *Geosmithia* se registraron únicamente en Nuevo León. En el caso de *Pleurostoma,* se registró el primer reporte para el cultivo (Cantú-Treviño *et al*., 2026). Las diferencias en la composición de hongos podrían estar relacionadas con las características particulares de las regiones muestreadas; sin embargo, se requieren estudios adicionales para determinar los factores que influyen en la distribución de estos hongos.

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que los cancros presentes en troncos y ramas de aguacate en las cuatro regiones productoras estudiadas están asociados a un complejo con diversidad de hongos fitopatógenos. Los 50 aislados obtenidos mostraron capacidad de inducir síntomas de cancro bajo condiciones controladas y fueron recuperados a partir del tejido necrótico. La caracterización morfológica y molecular mediante las regiones ITS, TEF1-α y β-tubulina permitió identificar 16 especies pertenecientes a los géneros *Pleurostoma, Lasiodiplodia, Neopestalotiopsis, Pestalotiopsis, Neofusicoccum* y *Botryosphaeria*. Los géneros *Pleurostoma* y *Fusarium* mostraron mayor frecuencia, asimismo, *Fusarium* y *Neopestalotiopsis* presentaron la distribución geográfica más amplia. Los resultados obtenidos contribuyen a una mejor comprensión sobre la etiología de los cancros del aguacate en México ampliando el conocimiento para el desarrollo de estrategias de manejo fitosanitario.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación. (SECIHTI) por el financiamiento otorgado para la realización de estudios de posgrado y desarrollo de este proyecto de investigación. De igual forma se reconoce el apoyo y disponibilidad de los productores cooperantes de Nuevo León y Jalisco en esta investigación al permitir el acceso a sus huertas.

Referencias Bibliográficas

Agrios G. 2005. Plant Pathology. 5th Edition. Elsevier Academic Press. Amsterdam. 35 p.

Cantú-Treviño, K. G., Gutiérrez-Díez, A., and Ochoa-Ascencio, S. (2026). First Report of Pleurostoma richardsiae causing canker and dieback of avocado trees in Mexico. *Journal of Phytopathology*, *174*(2), e70295.

Cenis, J. L. (1992). Rapid extraction of fungal DNA for PCR amplification. Nucleic acids research, 20(9), 2380.

Díaz L. D., & Y. Romero. R. 2016. Aislamiento e identificación de hongos fitopatógenos de Cultivos de Aguacate (*Persea americana* Mill). Tlamati Sabiduría 7(1):210-219.

Fontaine, F., Trouillas, F. P., Armengol, J., & Eskalen, A. (2025). Fungal trunk diseases: A global threat to grapevines. Annual Review of Phytopathology, 63(1), 577-602.

Glass, N.L. and Donaldson, G.C. (1995) 'Development of primer sets designed for use with the PCR to amplify conserved genes from filamentous ascomycetes', Applied and Environmental Microbiology, 61(4), pp. 1323–1330. [https://doi.org/10.1128/aem.61.4.1323-1330.1995]

Katoh, K. and Standley, D. M. (2013). MAFFT multiple sequence alignment software version 7: improvements in performance and usability. Molecular Biology and Evolution, 30(4), 772–780. https://doi.org/10.1093/molbev/mst010

Kumar, S., Stecher, G., Li, M., Knyaz, C., and Tamura, K. (2018). MEGA X: Molecular Evolutionary Genetics Analysis across computing platforms. Molecular Biology and Evolution, 35(6), 1547–1549.

Lombard, L., Van der Merwe, N. A., Groenewald, J. Z., and Crous, P. W. (2015). Generic concepts in Nectriaceae. Studies in Mycology, 80(1), 189-245.

Martino, I., Spadaro, D., & Guarnaccia, V. (2025). Fungal trunk pathogens of fruit and nut tree crops: identification, characterization, detection, and perspectives for a critical global issue. Plant Disease, 109(6), 1192-1210.

Maddison, W.P., and Maddison, D.R. (2019). Mesquite: a modular system for evolutionary analysis. Version 3.81.

McDonald, V. and Eskalen, A. (2011). *Botryosphaeriaceae* species associated with avocado branch cankers in California. Plant Disease, 95(11), 1465-1473.

Minh, B. Q., Schmidt, H. A., Chernomor, O., Schrempf, D., Woodhams, M. D., Von Haeseler, A., & Lanfear, R. (2020). IQ-TREE 2: new models and efficient methods for phylogenetic inference in the genomic era. Molecular biology and evolution, 37(5), 1530-1534.

Olmo, D., Armengol, J., León, M., & Gramaje, D. (2016). Characterization and pathogenicity of *Botryosphaeriaceae* species isolated from almond trees on the island of Mallorca (Spain). Plant Disease, 100(12), 2483-2491.

Phillips, A. J., Alves, A., Abdollahzadeh, J., Slippers, B., Wingfield, M. J., Groenewald, J. Z., & Crous, P. W. (2013). The *Botryosphaeriaceae*: genera and species known from culture. Studies in mycology, 76(1), 51–167. https://doi.org/10.3114/sim0021

Rambaut, A. (2018). FigTree v1.4.4: Tree figure drawing tool. Institute of Evolutionary Biology, University of Edinburgh.

Slippers, B., & Wingfield, M. J. (2007). *Botryosphaeriaceae* as endophytes and latent pathogens of woody plants: diversity, ecology and impact. Fungal biology reviews, 21(2-3), 90-106.

Slippers, B., Crous, P. W., Jami, F., Groenewald, J. Z., & Wingfield, M. J. (2017). Diversity in the *Botryosphaeriales*: Looking back, looking forward. Fungal biology, 121(4), 307-321.

Valencia, A. L., Gil, P. M., Latorre, B. A., & Rosales, I. M. (2019). Characterization and pathogenicity of Botry*osphaeriaceae* species obtained from avocado trees with branch canker and dieback and from avocado fruit with stem end rot in Chile. Plant disease, 103(5), 996-1005.

White, T. J., Bruns, T., Lee, S., & Taylor, J. (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. En M. A. Innis, D. H. Gelfand, J. J. Sninsky, & T. J. White (Eds.), PCR Protocols: A Guide to Methods and Applications (pp. 315–322). Academic Press.

Respuesta espectral de perfiles de suelo bajo diferentes sistemas de manejo agrícola: un enfoque basado en análisis digital de imágenes

Vicente Vidal Encinia-Uribe[1*]; Edgar Vladimir Gutierrez-Castorena[1]; Ma. del Carmen Gutierrez-Castorena[2]; Víctor Eustorgio Aguirre-Arzola[1]; Rigoberto Eustacio Vázquez-Alvarado[1]; Julia Mariana Márquez-Reyes[1].
[1]Facultad de Agronomía, UANL. Av. Francisco Villa S/N, Col. Ex Hacienda el Canadá, General Escobedo, Nuevo León, México. C.P. 66050. Tel. (81) 1340 4399. [2]Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, Km. 36.5 Carretera México-Texcoco C.P. 56230, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.
*Email: vicente.enciniaur@uanl.edu.mx

Resumen. La estructura del suelo se evalúa tradicionalmente mediante descripciones cualitativas de campo. Este estudio comparó la respuesta espectral y el efecto de tres sistemas de manejo agrícola (agricultura de conservación, labranza mecanizada y agricultura tradicional con aportes intensivos de MO) en los perfiles del suelo. Se fotografió un perfil por sistema y las imágenes RGB se procesaron con PCA, la transformación IHS y Tasseled Cap. Los píxeles se agruparon en cuatro clases (agregados, poros, raíces y no clasificados) y la separación entre clases se evaluó con el índice de Davies-Bouldin (DBI), que se contrastó con el color Munsell, la MO y la Dap. Las transformaciones redujeron el DBI en los tres sistemas: de 2.40 a 2.10 en labranza mecanizada, de 4.22 a 2.60 en conservación y de 3.06 a 2.50 en aportes intensivos de MO. Los valores finales superan 1, por lo que persistió traslape entre clases. La labranza mecanizada, con MO de 1.73 a 3.72 % y límites marcados entre horizontes, tuvo el menor DBI; el sistema con mayor MO (4.11 a 6.50 %) tuvo un valor intermedio, por lo que la separabilidad no se relacionó de forma simple con la MO. El color y el contraste entre horizontes parecen influir tanto como el contenido de carbono. El DBI debe interpretarse como indicador de separabilidad espectral y no de calidad física del suelo.
Palabras clave. análisis digital de imágenes, estructura del suelo, índice de Davies-Bouldin, perfiles de suelo.

Abstract. Soil structure is traditionally evaluated through qualitative field descriptions. This study compared the spectral response and the effect of three agricultural management systems (conservation agriculture, mechanised tillage, and traditional agriculture with intensive organic matter (OM) inputs) on soil profiles. We photographed one profile per system and processed the resulting RGB images using Principal Component Analysis (PCA), the IHS transformation, and the Tasselled Cap transformation. Pixels were grouped into four classes (aggregates, pores, roots, and unclassified), and the separation between these classes was assessed using the Davies-Bouldin Index (DBI), which was then compared against Munsell color, OM content, and bulk density (Dap). The transformations reduced the DBI across all three systems: from 2.40 to 2.10 for mechanised tillage, from 4.22 to 2.60 for conservation agriculture, and from 3.06 to 2.50 for the system with intensive OM inputs. Since the final values remained above 1, some overlap between classes persisted. Mechanised tillage—characterised by an OM content of 1.73–3.72% and distinct boundaries between soil horizons—yielded the lowest DBI; the system with the highest OM content (4.11–6.50%) showed an intermediate value, indicating that class separability is not simply related to OM content. Soil color and the contrast between horizons appear to be as

influential as carbon content. The DBI should be interpreted as an indicator of spectral separability rather than a measure of the physical quality of the soil.
Keywords: digital image analysis, Davies-Bouldin index, soil profiles, soil structure.

Introducción

La estructura del suelo constituye uno de los principales indicadores de calidad edáfica debido a su influencia sobre procesos fundamentales como la infiltración y almacenamiento de agua, la aireación, el crecimiento radical, la dinámica de nutrientes y la actividad biológica (Rabot *et al.,* 2018). La organización espacial de agregados, poros y raíces determina en gran medida el funcionamiento físico del suelo y su capacidad para sostener sistemas productivos estables y resilientes.

Las prácticas de manejo agrícola modifican continuamente esta organización estructural. La labranza mecanizada puede generar cambios en la distribución y la estabilidad de los agregados, alterar la continuidad de la red porosa y favorecer procesos de compactación (Topa *et al.,* 2021). Por el contrario, sistemas como la agricultura de conservación y la incorporación de residuos orgánicos promueven la acumulación de materia orgánica, la actividad biológica y el desarrollo de estructuras más estables, lo que contribuye a mejorar diversos atributos físicos y químicos del suelo (Xu *et al.,* 2024). Como consecuencia, los diferentes sistemas de manejo producen patrones estructurales contrastantes que pueden observarse a escala de perfil.

Tradicionalmente, la evaluación de estas características se ha basado en descripciones morfológicas realizadas en campo mediante la observación de atributos como color, estructura, porosidad y abundancia de raíces. Aunque este enfoque constituye una herramienta fundamental en la ciencia del suelo, gran parte de la información obtenida es cualitativa y depende de la experiencia del observador (Mandasari *et al.,* 2026). En los últimos años, el análisis digital de imágenes ha surgido como una alternativa capaz de complementar las observaciones convencionales mediante la extracción objetiva de información espacial y espectral de los perfiles edáficos (Gallegos y Bautista, 2022; Yang *et al*., 2024).

Las transformaciones espectrales como el Análisis de Componentes Principales (PCA), la transformación Intensidad-Tono-Saturación (IHS) y la transformación Tasseled Cap, originadas en el procesamiento de imágenes de percepción remota (Crist y Cicone, 1984), reorganizan la información espectral con el fin de resaltar variaciones que no siempre son evidentes en imágenes RGB convencionales, como las asociadas con el color, el contenido de materia orgánica, la distribución de agregados y otros elementos estructurales (Yang *et al.,* 2021; Gao *et al.,* 2024). Estas herramientas facilitan la segmentación y clasificación digital de componentes del suelo, proporcionando métricas cuantitativas para evaluar diferencias entre sistemas de manejo.

Sin embargo, aún existe información limitada sobre cómo las modificaciones

inducidas por distintos sistemas de manejo afectan la respuesta espectral de los perfiles de suelo y la capacidad de discriminar digitalmente componentes estructurales como agregados, poros y raíces. Asimismo, son escasos los estudios que relacionan los resultados de la clasificación digital con propiedades edáficas determinadas en laboratorio, en particular con variables estrechamente vinculadas a la calidad del suelo, como la materia orgánica y la densidad aparente (Aitkenhead *et al.,* 2016).

Considerando que la materia orgánica ejerce una marcada influencia sobre el color del suelo, la formación y estabilidad de agregados y la actividad biológica (Gao *et al.,* 2024; Wang *et al.,* 2026), es razonable esperar que los sistemas con mayores contenidos de carbono orgánico presenten una organización espacial y una respuesta espectral distintas respecto a sistemas sometidos a manejo convencional (Bucka *et al.*, 2019). Estas diferencias podrían reflejarse en la separabilidad de las clases obtenidas mediante técnicas de análisis digital de imágenes.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de distintos sistemas de manejo agrícola sobre la organización estructural del suelo mediante el análisis digital de imágenes de perfiles pedológicos. Para ello, se aplicaron transformaciones espectrales (PCA, IHS y Tasseled Cap) orientadas a la identificación de agregados, poros y raíces, y se evaluó la calidad de la separación entre clases mediante el índice de Davies-Bouldin (Anfossi y Chicco, 2026). Adicionalmente, los resultados fueron contrastados con propiedades físicas y químicas del suelo, particularmente el contenido de materia orgánica y la densidad aparente, con el fin de explorar la relación entre la respuesta espectral y las condiciones edáficas generadas por cada sistema de manejo.

Materiales y Métodos

Área de Estudio. Se realizó una selección de tres predios agrícolas pertenecientes a la misma serie de suelo (serie Duraznos) (Figura 1), con diferentes sistemas de producción agrícola: a) Agricultura de Conservación (19°27′59″ N, 98°53′44″ W); b) Labranza Mecanizada Tradicional (19°26′50″ N, 98°52′43″ W); y c) Agricultura tradicional con aportes intensivos de MO (19°27′10″ N, 98°52′38″ W). Las parcelas se ubican en el Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de México.

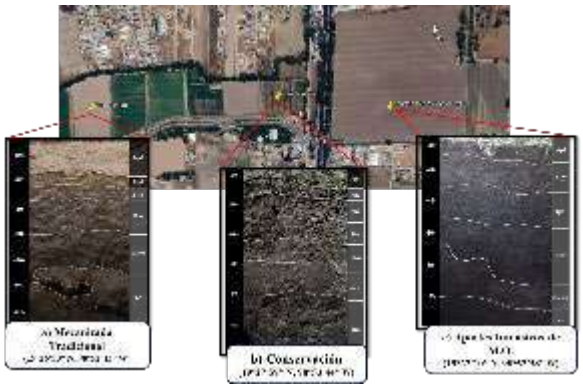


Figura 1. Ubicación de los perfiles pedológicos.

Perfiles Pedológicos. Se realizaron tres perfiles pedológicos (1 m de ancho x 2 m de largo x 1.20 m de profundidad) y se caracterizaron de acuerdo con el manual de descripción de perfiles de suelo (Cuanalo, 1990).

Captura de Imágenes. Se obtuvieron imágenes digitales de alta resolución de

cada perfil previamente acondicionado, a fin de garantizar una superficie de observación homogénea. Las fotografías fueron tomadas con una cámara DSLR Nikon D7200, utilizando un lente AF-S DX Micro NIKKOR 85mm f/3.5G ED VR, bajo condiciones controladas de iluminación y orientación perpendicular al plano del perfil con el fin de reducir efectos asociados a sombras y variaciones de reflectancia.

Las imágenes se almacenaron en formato RGB y posteriormente fueron procesadas para el análisis digital.

Procesamiento de Imágenes. Las imágenes RGB fueron sometidas a diferentes procesamientos espectrales con el propósito de resaltar características relacionadas con la estructura del suelo y mejorar la discriminación de los elementos morfológicos.

Los procesamientos utilizados fueron:

- Análisis de Componentes Principales (PCA).
- Transformación Intensidad-Tono-Saturación (IHS).
- Transformación Tasseled Cap.

El PCA permitió reducir la redundancia espectral entre las bandas y concentrar la información en componentes ortogonales. El procesamiento IHS separó la información asociada a intensidad, matiz y saturación de color, mientras que Tasseled Cap generó nuevas variables relacionadas con brillo, verdor y humedad relativa de la imagen.

Clasificación de Componentes. Sobre las imágenes procesadas, se realizó una clasificación orientada a la identificación de cuatro categorías estructurales:

- C1: agregados,
- C2: poros,
- C3: raíces,
- C4: elementos no clasificados.

La discriminación de clases se efectuó mediante técnicas de agrupamiento no supervisado, considerando la información espectral de cada transformación. Posteriormente se calcularon para cada grupo los parámetros de dispersión interna (S_i) y separación entre clases, con el fin de evaluar la calidad del agrupamiento obtenido.

La calidad de la clasificación fue evaluada mediante el índice Davies-Bouldin (DBI), calculado como:

$$DBI = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \max_{j \neq i}\left(\frac{S_i + S_j}{M_{ij}}\right)$$

donde:

- $S_i$corresponde a la dispersión interna de la clase i,
- M_{ij}representa la distancia entre los centroides de las clases iy j,
- $n$es el número total de clases.

Valores bajos del índice Davies-Bouldin indican que las observaciones de una misma clase se encuentran más agrupadas y que existe una mejor diferenciación entre clases. Por el contrario, valores altos sugieren un mayor traslape espectral entre los grupos identificados.

Además del valor global del índice, se examinó la contribución de cada clase al DBI con el fin de reconocer cuáles de los componentes estructurales aportaban una

mayor variabilidad dentro de cada sistema de manejo.

Los resultados de la clasificación se compararon posteriormente con algunas propiedades físicas y químicas del suelo. Para ello se consideraron el contenido de materia orgánica (MO), el carbono orgánico (CO) determinado por el método de Walkley-Black, la densidad aparente obtenida mediante el método de la parafina y el color del suelo determinado con la carta de colores Munsell. Los procedimientos analíticos se realizaron siguiendo las metodologías descritas por Van Reeuwijk (2002).

Resultados y Discusión

Los tres sistemas de manejo mostraron diferencias evidentes en la morfología del perfil, el color del suelo y el contenido de materia orgánica, las cuales también se observaron en las imágenes procesadas mediante PCA, IHS y Tasseled Cap (Figura 2).

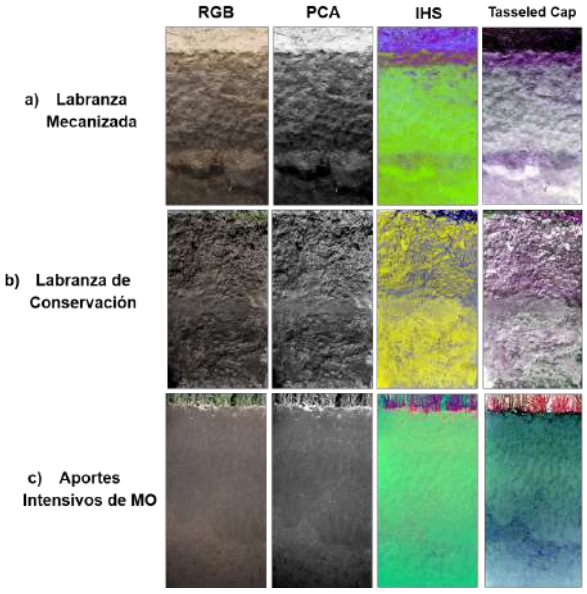


Figura 2. Perfiles de suelo de cada sistema productivo en RGB, PCA, IHS y Tasseled Cap.

En el sistema de labranza mecanizada, el perfil presentó una marcada diferenciación entre la capa superficial y los horizontes subyacentes. Los horizontes Ap mostraron colores más claros (2.5Y 5/1 a 2.5Y 6/1) y contenidos de materia orgánica entre 1.73 y 3.72 %. La transición entre los horizontes superficiales y el horizonte Bw fue claramente visible en la imagen RGB, con cambios notorios de color y textura a lo largo del perfil. Estas diferencias se acentuaron tras las transformaciones espectrales, particularmente en IHS, donde los límites entre zonas con respuestas espectrales distintas resultaron más fáciles de distinguir. En conjunto, este perfil presentó el mayor contraste visual de los tres sistemas evaluados.

El perfil correspondiente a la agricultura de conservación mostró una apariencia más uniforme en color y una distribución más continua de los rasgos estructurales. Los horizontes superficiales presentaron colores oscuros (10YR 4/1 a 10YR 3/1) y contenidos de materia orgánica entre 0.90 y 3.09 %. A diferencia de la labranza mecanizada, los límites entre horizontes fueron menos evidentes y se observó una distribución más homogénea de raíces, poros y agregados dentro del perfil. En las imágenes transformadas se apreciaron patrones más complejos y transiciones graduales, sin zonas claramente diferenciadas, especialmente en las transformaciones IHS y Tasseled Cap.

El perfil de suelos con aportes intensivos de materia orgánica presentó los valores más altos de carbono orgánico y materia orgánica, alcanzando hasta 3.77 % y 6.50 %, respectivamente, en el horizonte Ap1.

Estos contenidos estuvieron asociados con colores más oscuros y una matriz edáfica visualmente homogénea a lo largo de gran parte del perfil.

En comparación con los otros sistemas, las transformaciones espectrales mostraron una distribución de tonos más uniforme, reduciendo los contrastes internos de la matriz del suelo.

Para la clasificación se definieron cuatro clases: agregados (C1), poros (C2), raíces (C3) y elementos no clasificados (C4).

En los tres sistemas de manejo, las imágenes transformadas permitieron una diferenciación más clara de las clases que las imágenes RGB originales. Sin embargo, el efecto de las transformaciones no fue el mismo en todos los casos y dependió de las características de cada perfil.

La **labranza mecanizada** presentó los valores más bajos de DBI, disminuyendo de 2.40 a 2.10 tras la transformación espectral. Las mayores contribuciones al índice provinieron de la clase de agregados (C1), lo que indica que esta categoría presentó la mayor variabilidad interna. No obstante, el bajo valor global del índice sugiere que las cuatro clases se diferenciaron con relativa facilidad.

La **agricultura de conservación** mostró la mayor reducción relativa del índice, pasando de 4.22 a 2.60. A pesar de esta mejora, mantuvo el valor final más alto entre los tratamientos. La contribución al DBI fue similar en todas las clases, lo que sugiere una menor diferenciación espectral entre agregados, poros y raíces.

Por su parte, los **aportes intensivos de materia orgánica** redujeron el DBI de 3.06 a 2.50 (Cuadro 1). Las contribuciones de las clases fueron relativamente homogéneas, lo que refleja una estructura espectral menos contrastada que la observada en la labranza mecanizada.

Cuadro 1. Comparación de DBI para cada sistema de producción.

Tratamiento	DBI inicial	DBI final	Reducción (%)
Labranza mecanizada	2.40	2.10	12.5
Agricultura de conservación	4.22	2.60	38.4
Aportes intensivos de MO	3.06	2.50	18.3

Los tres sistemas difirieron en color, contenido de materia orgánica (MO) y respuesta espectral, pero la relación entre estas variables y el índice de Davies-Bouldin (DBI) no fue lineal. La labranza mecanizada, con MO de 1.73 a 3.72 % y colores claros en superficie (2.5Y 5/1 a 6/1), presentó el DBI más bajo (2.10). La agricultura de conservación, con colores más oscuros (10YR 4/1 a 3/1) y MO de 0.90 a 3.09 %, igual o menor que en la labranza mecanizada, mostró el mayor DBI (2.60). El sistema con aportes intensivos de MO, que registró los contenidos más altos (4.11 a 6.50 %), obtuvo un valor intermedio de 2.50. Por tanto, con los datos disponibles la MO por sí sola no explica las diferencias en separabilidad, y es probable que intervengan también el contraste entre horizontes, el tono y la luminosidad de la matriz, los residuos superficiales, la rugosidad del perfil y la humedad al momento de la fotografía. Esto es

coherente con la asociación entre el color del suelo y su contenido de MO y carbono orgánico (Yang *et al.,* 2021; Gao *et al.,* 2024), pero no basta para atribuir la separabilidad a un único factor.

En el sistema de aportes intensivos, la matriz oscura y visualmente uniforme redujo la variabilidad tonal en las transformaciones, lo que pudo disminuir el contraste entre los agregados, los poros y las raíces. En la labranza mecanizada, el menor DBI coincide con límites más definidos entre una capa superficial clara y horizontes subyacentes más oscuros. Ese contraste entre horizontes aumenta la varianza cromática entre grupos de píxeles y puede favorecer la separación de clústeres, de forma similar a lo reportado en la delimitación de horizontes mediante k-means a partir de color y textura (Gallegos y Bautista, 2022; Yang *et al*., 2024).

Los valores de DBI de los tres sistemas (2.10 a 2.60) superan la unidad, lo que indica traslape entre clases en todos los casos; las diferencias entre sistemas deben interpretarse como relativas y no como evidencia de una discriminación adecuada. La mayor reducción relativa (38.4 %) se observó en la agricultura de conservación, que partió del valor más alto en RGB (4.22), lo que sugiere que las transformaciones aportaron más donde el traslape original era mayor. La contribución similar de las cuatro clases al índice en este sistema indica que ninguna se separó claramente de las demás. Esta configuración es compatible con una estructura más compleja, pero su asociación con una mayor funcionalidad edáfica es una hipótesis que debe contrastarse mediante mediciones directas de la porosidad y la estabilidad de los agregados (Bucka *et al.,* 2019; Even y Cotrufo, 2024).

Conclusiones

Los sistemas evaluados presentaron diferencias en color, contenido de materia orgánica y comportamiento espectral. En todos los casos, las transformaciones aplicadas redujeron los valores del índice Davies-Bouldin, aunque en distinta magnitud. La mayor reducción se observó en agricultura de conservación, mientras que el menor valor final correspondió a la labranza mecanizada. Sin embargo, los valores obtenidos (2.10-2.60) indican que existe cierto grado de traslape entre las clases en los tres sistemas. Los resultados tampoco muestran una relación directa entre el contenido de materia orgánica y la separabilidad espectral. Por ejemplo, el sistema con mayor contenido de MO no presentó el menor DBI. Esto sugiere que otros factores, como el contraste entre horizontes, las diferencias de color dentro del perfil o la distribución espacial de los componentes estructurales, también influyen en la diferenciación de las clases.

En este contexto, el índice Davies-Bouldin debe entenderse como una medida de separación espectral entre grupos y no como un indicador directo de calidad física del suelo. Para fortalecer la interpretación de estos resultados será necesario validar las clases mediante delimitaciones de referencia, cuantificar su distribución dentro de cada perfil e incorporar réplicas que permitan evaluar la variabilidad asociada al manejo.

Agradecimientos

Al pueblo de México y a la SECIHTI por el financiamiento de mis estudios de posgrado mediante la Beca Nacional para estudios de posgrado.

A mi comité de tesis por sus valiosas aportaciones y comentarios para mejorar mi trabajo de investigación.

A la Facultad de Agronomía UANL, por la accesibilidad a espacios de trabajo e investigación.

Referencias Bibliográficas

Aitkenhead, M., Coull, C., Gwatkin, R., & Donnelly, D. (2016). Automated soil physical parameter assessment using smartphone and digital camera imagery. Journal of Imaging, 2(4), 35. https://doi.org/10.3390/jimaging2040035.

Anfossi, A., & Chicco, D. (2026). An easy guide to the Davies-Bouldin index for unsupervised internal clustering evaluation. Discover Computing, 29(1), 212.

Bucka, B., Kölbl, A., Uteau, D., Peth, S., & Kögel-Knabner, I. (2019). Organic matter input determines structure development and aggregate formation in artificial soils. Geoderma, 354, 113881.

Crist, P., & Cicone, C. (1984). A physically-based transformation of Thematic Mapper data: The TM Tasseled Cap. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-22(3), 256-263.

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

Even, R. J., & Cotrufo, M. F. (2024). The ability of soils to aggregate, more than the state of aggregation, promotes protected soil organic matter formation. Geoderma, 442, 116760.

Gallegos, Á., & Bautista, F. (2022). Soil profile photograph dataset from central Mexico to delineate horizons and quantify coarse fragments. Data in Brief, 40, 107749.

Gao, Q., Chen, Y., Zhang, H., Chen, J., & Wang, L. (2024). Machine learning-based prediction of soil organic matter via smartphone. All Life, 17(1). https://doi.org/10.1080/26895293.2024.2422109

Mandasari, F., Wibowo, E. P., Kusuma, T. M., & Wulandari, S. (2026). Quantitative analysis of soil bearing capacity using image-based morphology and capacitive moisture sensing. Informatica, 50(13), 215-228. https://doi.org/10.31449/inf.v50i13.12993.

Rabot, E., Wiesmeier, M., Schlüter, S., & Vogel, H.-J. (2018). Soil structure as an indicator of soil functions: A review. Geoderma, 314, 122-137. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009

Topa, D., Cara, I. G., & Jităreanu, G. (2021). Long term impact of different tillage systems on carbon pools and stocks, soil bulk density, aggregation and nutrients: A field

meta-analysis. Catena, 199, 105102.

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

Wang, Z., Jia, H., Zhao, Y., Zhang, M., Feng, M., Wang, C., & Yang, W. (2026). Effects of soil moisture on digital image estimation of soil organic carbon. Crops, 42(2), 238-246.

Xu, C., Liu, W., Li, J., Wu, J., Zhou, Y., & Kader, R. (2024). Dynamic change of soil aggregate stability and infiltration properties during crop growth under four tillage measures in Mollisols region of northeast China. Frontiers in Earth Science, 12, 1357467.

Yang, J., Shen, F., Wang, T., Luo, M., Li, N., & Que, S. (2021). Effect of smart phone cameras on color-based prediction of soil organic matter content. Geoderma, 115365. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115365

Yang, K., Ci, E., Liu, B., Chen, Y., & Xie, Y. (2024). Boundary identification of purple soil horizon based on K-means clustering and image segmentation. Acta Pedologica Sinica, 61(4), 939-951.