

15° CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y AGRONÓMICAS

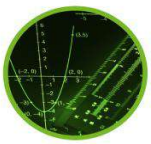
15-16 octubre de 2026

MEMORIA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

Áreas Temáticas



Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible



Economía Agrícola, Desarrollo Territorial, Tecnología e Innovación Social



Ciencias Biológicas y Agronómicas



Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global



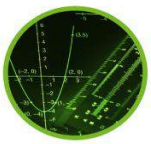
Desarrollo rural, agroecología y cambio climático

MEMORIA DE LA MESA 3

CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGRONÓMICAS

TOMO III

Áreas Temáticas



Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible



Economía Agrícola, Desarrollo Territorial, Tecnología e Innovación Social



Ciencias Biológicas y Agronómicas



Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global



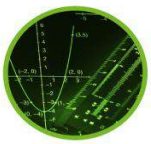
Desarrollo rural, agroecología y cambio climático

TEMÁTICAS

7. **FITOQUÍMICA, COMPUESTOS BIOACTIVOS Y ETNOBOTÁNICA**
8. **SUELOS, SISTEMAS AGROFORESTERALES Y SILVICULTURA**
9. **ECOLOGÍA, FAUNA SILVESTRE Y CONSERVACIÓN**
10. **POSCOSECHA, CALIDAD Y AGROINDUSTRIA**
11. **PRODUCCIÓN ANIMAL, ACUACULTURA Y SANIDAD ANIMAL**
12. **SOCIOECONOMÍA, MERCADO, DESARROLLO RURAL, CLIMATOLOGÍA Y EDUCACIÓN**

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




Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible


Economía Agrícola, Desarrollo Territorial, Tecnología e Innovación Social


Ciencias Biológicas y Agronómicas


Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global


Desarrollo rural, agroecología y cambio climático

Compiladoras y Editoras

Rosa María García Núñez

Graciela Huerta Miranda

Amelia Rendón García

Contenido

TEMÁTICA 7. FITOQUÍMICA, COMPUESTOS BIOACTIVOS Y ETNOBOTÁNICA 10

Actividad antitumoral *in vitro* del extracto metanólico de *Smilax aspera* L. (zarzaparrilla)

Nancy Edith Rodríguez-Garza, Ana Laura Delgado-Miranda, Ramiro Quintanilla-Licea y César Iván Romo-Sáenz 11

Actividad citotóxica de extractos de *Parthenium hysterophorus* en células SiHa

Brisa Carmona Zamora, Yaraset López Lorenzo, Gisela Gutiérrez Iglesias, María Elena Sánchez Mendoza 20

Citotoxicidad y genotoxicidad de extractos etanólicos de tres especies vegetales de uso etnomédico en la Sierra Negra de Puebla, México

Velázquez-Vázquez, Guadalupe, Aragón-Sánchez, Miguel, López-Olguín, Jesús Francisco, Ortega Martínez, Luis Daniel 29

Conocimiento etnobotánico y uso tradicional de plantas medicinales en comunidades rurales del centro-sur de Chihuahua

Samantha Ontiveros Gómez, José Eduardo Magaña Magaña, Guadalupe Ontiveros Gómez, Lluvia Nicte-Ha Magaña Chávez 40

Cosmovisión de los tepetates en comunidades del estado de México y Tlaxcala

Miriam Galán Resendiz, Rogelio Álvarez Hernández, Daniel Mendoza Tirzo, Jacqueline Galán Reséndiz 59

Efecto del baño ultrasónico en el contenido de alcaloides totales del extracto de *Argemone ochroleuca*

Fátima Flores Zavala, Jesús Hernández Ruiz, Rocío Alejandra Imperial Cervantes 77

Evaluación del potencial de *Trichoderma* sp. para el biocontrol de hongos fitopatógenos asociados al cultivo de maíz en la Orinoquía colombiana

Nathali López Cardona, Gloria Patricia Barrera Cubillos, Alejandro Villabona Gélvez, Jorge Luis Cárdenas Huérfano 88

Obtención de extractos de cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante cromatografía flash automatizada, caracterización espectroscópica FT-IR y espectrométrica LC-MS

Francisco Alexander Venegas-Escarcega, Holber Zuleta-Prada, Teodoro Espinosa-Solares, Emanuel Hernández-Núñez 99

Revalorización de la Medicina Tradicional Maya a través de un enfoque científico como estrategia para la conservación del Patrimonio biocultural de Yucatán

Mar Anabel Pérez Povedano, Blanca Marina Vera Ku, Sergio Ruben Peraza Sánchez 111

TEMÁTICA 8. SUELOS, SISTEMAS AGROFORESTERALES Y SILVICULTURA 131

Aprovechamiento de sistemas agroforestales como estrategia de diversificación productiva en Tlaxco, Tlaxcala

Nidia Sarahí Reséndiz Flores, Maricela Hernández Vázquez, Silvia Herrera Cortés, Minerva Morales Flores 132

Caracterización fisicoquímica del suelo para el monitoreo y manejo de sistemas agroforestales de cacao bajo manejo agroecológico en Cunduacán, Tabasco

Julio César Buendía Espinoza, Leslie Montserrat Montero Torres, Marina Olivia Franco Hernández, Elisa del Carmen Martínez Ochoa 142

Correlación entre producción de resina de copal y morfología de árboles productores

Rosa María García Núñez 162

Evaluación del desarrollo vegetativo de *Capsicum annuum* L. bajo la influencia de té de vermicompost y rizobacterias

Ivan Cabanzo-Atilano, Manuel Sandoval-Villa, María Guadalupe Peralta-Sanchez, Libia Iris Trejo-Tellez 175

Diversidad fúngica de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan

María Sol Robledo y Monterrubio, Higinio Francisco Arias Velázquez, Silvia Bautista Hernández, Isaac Ramírez Barraza 182

Diversidad, estructura horizontal y vertical de un bosque templado bajo manejo forestal en Durango, México

Gabriel Graciano-Ávila, Benedicto Vargas-Larreta, José Encarnación Luján-Soto 196

Evaluación de la Fertilidad e Índices de Sostenibilidad de los Suelo en Parcelas con Nopal Orgánico y Convencional en Axapusco, México

Álvarez Hernández Rogelio, Salazar Torres José Cruz, Galán Reséndiz Miriam 213

Piñonares de San Luis Potosí: diversidad y composición florística de un ecosistema estratégico del Altiplano Mexicano

Joaquín Parra-Álvarez, Ro Linx Granados-Victorino, Diódoro Granados-Sánchez, Antonio Villanueva-Morales 226

Sinergia entre restauración y aprovechamiento de leña del tepozán (*Buddleia cordata* H. B. K.)

Mario Castelán Lorenzo, Jorge Antonio Bustillos Herrera, Mercedes María Cuenca Condoy 236

TEMÁTICA 9. ECOLOGÍA, FAUNA SILVESTRE Y CONSERVACIÓN 248

Áreas prioritarias para la conservación de la flora arbórea templada en Michoacán

José Roberto Morales-Vásquez, Andrés Torres-Miranda, Carlos Méndez-Inocencio ... 249

Detección de ADN ambiental liberado por larvas de *Ambystoma mexicanum* en sistemas controlados

Dvorak Montiel Condado, Azucena del Carmen González Horta, Brenda González Hernández, Omar González Amezcua 265

Diversidad y uso del hábitat por aves en un sistema de labranza de conservación cero-cerco vivo

Saúl Ugalde-Lezama, Claudio Romero-Díaz, Luis Antonio Tarango-Arámbula, Eliseo Hernández-Hernández, Cristian Ismael Torres-González, Rosa María García-Núñez .. 273

Monitoreo de Fauna Silvestre en el predio Ecoturístico “Ocho amigos”, El Corrido, Tomatlán, Jalisco

Claudio Romero-Díaz, Saúl Ugalde-Lezama, Genaro Olmos Oropeza, Eliseo Hernández-Hernández, Cristian Ismael Torres-González, Rosa María García Núñez 295

TEMÁTICA 10. POSCOSECHA, CALIDAD Y AGROINDUSTRIA 316

Calidad física, química y mineral de frutos de *Solanum lycopersicum* L. provenientes de plantas tratadas con extractos vegetales

Aracely Martínez-Bautista, Eduardo Osorio-Hernández, Sarahi Rubio-Tinajero, Karen Jazmin Martínez-Netro 317

Características de color del chile chorro (*Capsicum annum*) en Dolores Hidalgo

Ana Isabel Mireles Arriaga, Ana Martha Cruz Ávalos, Rocío Alejandra Imperial Cervantes, Jesús Hernández Ruíz 328

Caracterización morfológica, fisicoquímica y organoléptica de *Agave salmiana* en cuatro comunidades productoras de pulque de Tlaxcala

Escobar-González, D., Serafín-Higuera, E. L., Gallegos-Flores, P. I. y Barrientos-Rivera, G..... 338

Extracción de quitosano a partir de peces diablo mediante dos técnicas

Rafael Juarez López, César Mateo Flores Ortíz, Adolfo Amador Mendoza, Martha Elena Aguilera Morales 349

Influencia del almacenamiento en seco, la rehidratación y las condiciones de conservación sobre la calidad postcosecha de *Tulipa spp*. cv. 'Orange Juice'

Pablo Balderrama-Jiménez, María de los Ángeles Rodríguez-Elizalde 366

TEMÁTICA 11. PRODUCCIÓN ANIMAL, ACUACULTURA Y SANIDAD ANIMAL 378

Degradación *in vitro* de dos dietas para finalización de becerros con maíz rolado a diferente presión

Luis Enrique Montalvo Madrigal, Giselle Patricia Triana Valencia, Rey Aureliano Márquez Caudillo, Juan Manuel Pinos Rodríguez 379

Detección molecular por RT-PCR y factores epidemiológicos de norovirus genogrupo I en unidades de producción cunícola del Estado de México

Anahí Jiménez Ramos, Linda Guiliana Bautista Gómez, Martinez Castañeda José Simón, Fonseca Coronado Salvador 386

Evaluación del indicador cost-price squeeze como herramienta diagnóstica en tilapia cultivada

Luna-Mora Ariana, Alcantar-Vázquez Juan Pablo, Kido-Cruz Ma. Teresa..... 398

Evaluación del potencial de hojas de huizache como alimento para rumiantes

Diana Sofía Torres Velázquez, Karina Aide Araiza Ponce, Pablo Alfredo Domínguez Martínez, Rafael Jiménez Ocampo 415

Optimización de la Producción y Calidad Láctea mediante la Aplicación de un Activador Ruminal (MEBA)

Pacheco Hernández Armando 427

TEMÁTICA 12. SOCIOECONOMÍA, MERCADO, DESARROLLO RURAL, CLIMATOLOGÍA Y EDUCACIÓN 435

Análisis del desarrollo comunitario sostenible del Ejido el Diez, Chihuahua

Arely Shirley Viaña Macías, María Elvira González Anchondo, Fabiola Iveth Ortega Montes, José Eduardo Magaña Magaña 436

Análisis estratégico de mercado del centro-sur de Chihuahua para productos derivados de nopal (*Opuntia spp*.)

Arely Sofia Ontiveros Rodríguez, José Eduardo Magaña Magaña, María Guadalupe Macías López, María del Rosario Baray Guerrero 448

Geointeligencia como disciplina estratégica para la Innovación Educativa en la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo

Paul Reyes Ayala 466

Sistema de información climática local y proyecciones de cambio climático para el estado de Sinaloa (SICCLOS)

Gabriela Ramírez Ojeda, Alejandro García González, José Germán Flores Garnica 476

TEMÁTICA 7. FITOQUÍMICA, COMPUESTOS BIOACTIVOS Y ETNOBOTÁNICA

Actividad antitumoral *in vitro* del extracto metanólico de *Smilax aspera* L. (zarzaparrilla)

Nancy Edith Rodríguez-Garza, Ana Laura Delgado-Miranda[1], Ramiro Quintanilla-Licea y César Iván Romo-Sáenz[2]

Resumen

El cáncer es un importante problema de salud pública que presenta altas tasas de morbilidad y mortalidad anualmente, por lo que es importante buscar nuevas estrategias terapéuticas para tratarlo. Las plantas son una importante fuente de metabolitos con diversas propiedades biológicas, incluida la actividad antitumoral. *Smilax aspera* L. es una planta medicinal que se utiliza tradicionalmente como infusión para tratar diversos padecimientos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial antitumoral del extracto metanólico crudo de *S. aspera* frente a las líneas celulares de melanoma murino (B16F10), cáncer de colon humano (HT-29) y adenocarcinoma cervical humano (HeLa). Para esto, la raíz de *S. aspera* se adquirió en la herbolaria Pacalli y se obtuvo el extracto metanólico crudo mediante extracción Soxhlet. La inhibición del crecimiento se determinó mediante el método del bromuro de 3-(4,5-dimetiltiazol-2-ilo)-2,5-difeniltetrazol (MTT) frente a las líneas tumorales ya mencionadas, así como células epiteliales renales de mono verde africano (Vero) como control no tumoral. El extracto mostró la mayor actividad contra la línea HeLa (CI_{50} = 198.9 µg/mL, IS 4.49), seguida por la línea HT-29 (CI_{50} = 294.0 µg/mL, IS 3.04) y por último la línea B16F10 (CI_{50} = 368.4 µg/mL, IS 2.43). Se demostró el potencial antitumoral del extracto metanólico crudo de *S. aspera*.

Palabras clave: *Smilax aspera*; actividad antitumoral; plantas medicinales

Abstract

Cancer is a major public health problem associated with high morbidity and mortality rates worldwide, making the search for new therapeutic strategies essential. Plants are an important source of metabolites with diverse biological properties, including antitumor activity. *Smilax aspera* L. is a medicinal plant traditionally used as an herbal infusion to treat various

[1] Departamento de Microbiología e Inmunología, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza 66455, N.L., México. nancy.rodriguezgrz@uanl.edu.mx, laura.delgadom@uanl.edu.mx, cesar.rmosnz@uanl.edu.mx
[2] Departamento de Química, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza 66455, N.L., México. ramiro.quintanillalc@uanl.edu.mx

ailments. The aim of this study was to evaluate the antitumor potential of the crude methanolic extract of *S. aspera* against murine melanoma (B16F10), human colon cancer (HT-29), and human cervical adenocarcinoma (HeLa) cell lines. To this end, *S. aspera* roots were purchased from the Pacalli herbal store, and the crude methanolic extract was obtained by Soxhlet extraction. Growth inhibition was determined using the 3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide (MTT) assay against the aforementioned tumor cell lines, with African green monkey kidney epithelial (Vero) cells used as the non-tumor control. The extract showed the highest activity against the HeLa cell line (IC_{50} = 198.9 µg/mL, SI = 4.49), followed by the HT-29 cell line (IC_{50} = 294.0 µg/mL, SI = 3.04), and finally the B16F10 cell line (IC_{50} = 368.4 µg/mL, SI = 2.43). These results demonstrate the antitumor potential of the crude methanolic extract of *S. aspera*.

Keywords: *Smilax aspera*; antitumor activity; medicinal plants

Introducción

El cáncer es un grupo de enfermedades que se caracterizan por presentar un crecimiento descontrolado y anormal de las células, así como la posibilidad de invasión a tejidos sanos de otras partes del cuerpo (National Cancer Institute, 2021). Este es un serio problema de salud pública que ocasiona altas tasas de morbilidad y mortalidad anualmente; tan solo en el año 2022 se presentaron 19.9 millones de casos nuevos y alrededor de 10 millones de defunciones a causa de esta enfermedad (Ferlay et al. 2024). Hasta la fecha se conocen más de 100 tipos distintos de cáncer los cuales se clasifican según el tipo de célula que inicialmente se vio afectada (National Cancer Institute, 2021).

En la mayoría de los tipos de cáncer, la quimioterapia es el tratamiento de elección, no obstante, la aparición de células cancerosas resistentes ante los agentes quimioterapéuticos (Cui et al., 2020), así como los graves efectos secundarios que generan en los pacientes hace imperativa la búsqueda de nuevos fármacos que sean más eficaces y menos tóxicos para los pacientes (Zhang et al., 2018).

Los productos naturales, especialmente los provenientes de plantas, son una importante fuente de metabolitos con diversas propiedades biológicas que pueden ser utilizados como principios activos para el tratamiento de distintas enfermedades (Wang et al., 2020). En los últimos años se ha demostrado que los metabolitos secundarios de las plantas, como los flavonoides, alcaloides, terpenoides y saponinas, entre otros, son importantes fuentes de potentes agentes antitumorales (Dutt et al., 2019).

Smilax aspera L., comúnmente conocida como zarzaparrilla en México, es una planta trepadora perenne de la familia Smilacaceae originaria de la cuenca del Mediterráneo, pero que actualmente se encuentra ampliamente distribuida a nivel mundial (Dalkılıç et al., 2022). La raíz de esta planta se usa tradicionalmente como infusión para tratar la sífilis, diabetes, reumatismo y síntomas de la menopausia (Delgado-Pelayo & Hornero-Méndez, 2012). Asimismo, investigaciones recientes han demostrado que esta planta presenta actividad contra diversas líneas tumorales (Cappadone et al., 2019; Dalkılıç et al., 2022; Elizondo-Luévano et al., 2022; Rodríguez-Garza et al., 2023; Kakouri et al., 2023).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial antitumoral del extracto metanólico crudo de *S. aspera* frente a las líneas celulares de melanoma murino (B16F10), cáncer de colon humano (HT-29) y adenocarcinoma cervical humano (HeLa).

Materiales y métodos

Obtención del material vegetal y el extracto metanólico crudo

La raíz de *Smilax aspera* fue adquirida en la herbolaria científica Pacalli. Una muestra de ella fue depositada en el herbario de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, México, donde se le asigno un número de voucher. La taxonomía de la planta fue cotejada en el sitio web The World Flora Online (WFO) Plant List (https://wfoplantlist.org/plant-list/; accesado el 16/03/2024).

La extracción se realizó colocando 25 g de la planta (seca y molida) en un extractor Soxhlet con 500 mL de metanol absoluto como solvente. La extracción se mantuvo por 48 h, trascurrido el tiempo el extracto se filtró y se concentró por medio de una rotoevaporación a vacío con un rotavapor (Buchi R-3000; Brinkman Instruments, Inc., Westbury, NY, USA). La totalidad del solvente se retiró empleando un desecador de vidrio a vacío (Rodríguez-Garza et al. 2019). El rendimiento de la extracción se calculó mediante la siguiente formula:

$$\% \text{ Rendimiento } = \frac{\text{Peso del extracto seco}}{\text{Peso del material vegetal}} \times 100 \qquad (1)$$

Posteriormente 100 mg del extracto se disolvieron en 1 mL de dimetilsulfóxido (DMSO; Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) y se esterilizó por filtración utilizando un filtro de membrana con un tamaño de poro de 0.22 µm (Corning Incorporated, Corning, NY, USA). El extracto se almacenó a −20 ºC hasta su uso. A partir de esta solución concentrada se prepararon las soluciones de trabajo utilizadas en los distintos experimentos. La concentración final de DMSO empleada en los cultivos celulares fue menor al 1% (v/v), la cual no afecta la viabilidad celular.

Líneas celulares y condiciones de cultivo celular

Se emplearon células de melanoma murino B16F10 (ATCC CRL-6475), células de cáncer de colon humano HT-29 (ATCC HTB-38), células de adenocarcinoma cervical humano HeLa (ATCC CCL-2) y células epiteliales renales de mono verde africano Vero (ATCC CCL-81). Todas las líneas celulares se mantuvieron en el Medio Eagle modificado de Dulbecco (DMEM; Life Technologies) suplementado con 10 % de suero fetal bovino inactivado por calor (SFB; Life Technologies) y antibiótico/antimicótico al 1 % (Life Technologies). Las células se cultivaron a 37 ºC en una atmósfera con 5 % de CO_2 y una humedad relativa del 95 % (Elizondo-Luévano et al., 2023).

Inhibición del crecimiento celular

En microplacas transparentes de polipropileno de 96 pozos de fondo plano (Corning Incorporated, Corning, NY, USA) se sembraron 1×10^4 células/pozo en medio DMEM. Después de 24 h de incubación, las células fueron tratadas con el extracto metanólico de *S. aspera* en concentraciones finales de 3.9 a 1,000 µg/mL. Como control positivo se utilizó el antineoplásico sulfato de vincristina (Hospira, Warwickshire, UK) a 100 µg/mL y como control negativo medio de cultivo sin tratar. Las células se incubaron por 48 h a 37 ºC con 5 % de CO_2 y la viabilidad celular se determinó mediante el método colorimétrico del bromuro de 3-(4,5- dimetiltiazol-2-ilo)-2,5-difeniltetrazol (MTT; Affymetrix, Cleveland, OH, USA) al agregar 15 µL de MTT (concentración final 0.5 mg/mL) e incubar la placa a 37 ºC por 3 h. A continuación, las placas se decantaron y los cristales de formazán se disolvieron con 100 µL de DMSO. La densidad óptica (DO) se midió a 570 nm en un lector de microplacas (MULTISKAN GO; Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, US) (Quintanilla-Licea et al., 2023). El porcentaje de inhibición del crecimiento celular se calculó de la siguiente manera:

$$\%\ \text{Inhibicion del crecimiento} = 100 - \left(\left(\frac{\text{DO}_{570}\ \text{células tratadas}}{\text{DO}_{570}\ \text{células sin tratar}}\right) \times 100\right) \qquad (2)$$

Determinación de los índices de selectividad (IS)

Los índices de selectividad (IS) se determinan para evaluar el potencial citotóxico en células tumorales en relación con la toxicidad en las células normales. El SI se calculó dividiendo la CI_{50} de las células no tumorales (Vero) por el de las células tumorales (B16F10, HT-29 o HeLa) empleando la siguiente formula:

$$IS = \frac{CI_{50} \text{ células no tumorales}}{CI_{50} \text{ células tumorales}} \qquad (3)$$

Análisis estadístico

Los datos representan las medias ± la desviación estándar (DS) de al menos tres experimentos independientes por triplicado. Se utilizó una regresión no lineal para calcular los valores de CI_{50} (concentración inhibitoria máxima media). Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico GraphPad Prism 8 (GraphPad Software Inc., San Diego, CA).

Resultados y discusión

Smilax aspera es una planta ampliamente utilizada en la medicina tradicional para el tratamiento de diversos padecimientos, entre ellos sífilis, reumatismo, dolor de estómago, distensión abdominal, lepra, psoriasis, diabetes y trastornos asociados con la menopausia (Patel et al., 2020). Además de sus usos etnomedicinales, diversos estudios han demostrado que posee actividad antibacteriana (Fontana et al., 2024), antiinflamatoria (Amira et al., 2012), antioxidante, antihemolítica y citotóxica (Elizondo-Luévano et al., 2022; Rodríguez-Garza et al., 2023). En cuanto a su actividad antitumoral, se ha reportado citotoxicidad frente a líneas celulares de osteosarcoma humano U2OS (Cappadone et al., 2019), cáncer de mama MDA-MB-231, cáncer de pulmón A549 y cáncer de ovario OVCAR3 (Dalkılıç et al., 2022), hepatocarcinoma HEP-G2 (Elizondo-Luévano et al., 2022), linfoma murino L5178Y-R (Rodríguez-Garza et al., 2023), glioblastoma humano A172 y rabdomiosarcoma humano TE671 (Kakouri et al., 2023). Sin embargo, hasta el momento no existían reportes sobre su actividad frente a las líneas celulares de melanoma murino B16F10, cáncer de colon humano HT-29 y adenocarcinoma cervical humano HeLa.

Para este estudio, la raíz de *S. aspera* fue adquirida en la herbolaria Pacalli. Una muestra de la planta fue indexada al herbario de la FCB-UANL como evidencia, donde se le asignó un numero de voucher de identificación. El extracto metanólico de *S. aspera* se obtuvo mediante extracción Soxhlet teniendo un rendimiento de 18.26 %. La información específica de la planta, así como su rendimiento se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Identificación taxonómica de *S. aspera* y rendimiento de su extracto metanólico crudo.

Nombre científico	Nombre común en Mexico	Familia	Parte utilizada	No. voucher	Rendimiento (%)
Smilax aspera L.	Zarzaparrilla	Smilacaceae	Raíz	30655	18.26

La actividad inhibitoria del crecimiento del extracto metanólico crudo de la raíz de *S. aspera* contra las células B16F10, HT-29, HeLa y Vero se evaluó mediante el ensayo de MTT. Se probaron diferentes concentraciones de los extractos (3.9 - 1,000 µg/mL) contra las diferentes líneas celulares. Todas las líneas celulares mostraron un comportamiento dependiente de la contratación; ya que se observó que, al aumentar la contracción empleada del extracto, aumentaba la inhibición del crecimiento celular. El valor de la CI_{50} del extracto en las diferentes líneas celulares se estimó mediante un análisis de regresión no lineal y se muestra en el Cuadro 2. El extracto mostró la mayor actividad inhibitoria, así como el mayor índice de selectividad contra la línea HeLa presentado una CI_{50} de 198.9 µg/mL y un IS de 4.49; seguido por la línea HT-29 con una CI_{50} de 294.0 µg/mL y un IS de 3.04; y por último la línea B16F10 con una CI_{50} de 368.4 µg/mL y un IS de 2.43.

Cuadro 2. Actividad inhibitoria del crecimiento celular del extracto metanólico crudo de *S. aspera* contra las células Vero, B16F10, HT-29 y HeLa.

Planta	Vero	B16F10		HT-29		HeLa	
	CI_{50}	CI_{50}	IS	CI_{50}	IS	CI_{50}	IS
S. aspera	893.4 ± 6.4	368.4 ± 5.1	2.43	194.0 ± 6.0	4.6a	198.9 ± 8.5	4.49

Los datos representan las medias ± DS de la CI_{50} (µg/mL) del extracto metanólico de *S. aspera* frente a las líneas celulares evaluadas. El índice de selectividad (IS) representa el cociente de la CI_{50} de las células Vero entre la CI_{50} de la línea celular tumoral después de 72 h de incubación.

Los valores de CI_{50} obtenidos (198.9–368.4 µg/mL) se encuentran por debajo del umbral de 500 µg/mL propuesto para considerar a un extracto crudo como prometedor para el desarrollo de agentes antitumorales (Ntungwe et al., 2021). De igual forma, los índices de selectividad superiores a 2 en todas las líneas celulares evaluadas indican una adecuada selectividad hacia las células cancerosas y una baja toxicidad sobre células no tumorales (Rashidi et al., 2017). En conjunto, estos resultados constituyen el primer reporte de la actividad inhibitoria del extracto metanólico crudo de *S. aspera* frente a las líneas celulares B16F10, HT-29 y HeLa, respaldando su potencial como fuente de compuestos con actividad antitumoral y justificando

estudios posteriores dirigidos al aislamiento de los metabolitos responsables de este efecto y al esclarecimiento de sus mecanismos de acción.

Conclusiones

El extracto metanólico crudo de la raíz de *Smilax aspera* presentó potencial antitumoral contra las líneas celulares de melanoma murino (B16F10), cáncer de colon humano (HT-29) y adenocarcinoma cervical humano (HeLa), mostrando una actividad inhibitoria del crecimiento dependiente de la concentración y una adecuada selectividad hacia las células tumorales. Estos resultados respaldan el potencial de *S. aspera* como fuente de compuestos bioactivos con actividad antitumoral y justifican la realización de estudios dirigidos al aislamiento e identificación de los metabolitos responsables de este efecto, así como a la elucidación de sus mecanismos de acción.

Literatura citada

Amira, S., Dade, M., Schinella, G., & Ríos, J.-L. (2012). Anti-inflammatory, anti-oxidant, and apoptotic activities of four plant species used in folk medicine in the Mediterranean basin. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*, *25*(1), 65–72.

Cappadone, C., Mandrone, M., Chiocchio, I., Sanna, C., Malucelli, E., Bassi, V., Picone, G., & Poli, F. (2019). Antitumor potential and phytochemical profile of plants from Sardinia (Italy), a hotspot for biodiversity in the Mediterranean Basin. *Plants*, *9*(1), 26. https://doi.org/10.3390/plants9010026

Cui, C., Yang, J., Li, X., Liu, D., Fu, L., & Wang, X. (2020). Functions and mechanisms of circular RNAs in cancer radiotherapy and chemotherapy resistance. *Molecular Cancer*, *19*(1). https://doi.org/10.1186/s12943-020-01180-y

Dalkılıç, S., Korkmaz, İ., Dalkılıç, L. K., Akay, G., & Fidan, S. (2022). In vitro cytotoxic effects of *Smilax aspera* L. roots on cancer cell lines. *Food Bioscience*, *46*, 101501. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101501

Delgado-Pelayo, R., & Hornero-Méndez, D. (2012). Identification and quantitative analysis of carotenoids and their esters from sarsaparilla (*Smilax aspera* L.) berries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *60*(33), 8225–8232. https://doi.org/10.1021/jf302719g

Dutt, R., Garg, V., Khatri, N., & Madan, A. K. (2019). Phytochemicals in anticancer drug development. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry*, *19*(2), 172–183. https://doi.org/10.2174/1871520618666181106115802

Elizondo-Luévano, J. H., Gomez-Flores, R., Verde-Star, M. J., Tamez-Guerra, P., Romo-Sáenz, C. I., Chávez-Montes, A., Rodríguez-Garza, N. E., & Quintanilla-Licea, R. (2022). In vitro cytotoxic activity of methanol extracts of selected medicinal plants traditionally used in Mexico against human hepatocellular carcinoma. *Plants*, *11*(21), 2862. https://doi.org/10.3390/plants11212862

Elizondo-Luévano, J. H., Rodríguez-Garza, N. E., Bazaldúa-Rodríguez, A. F., Romo-Sáenz, C. I., Tamez-Guerra, P., Verde-Star, M. J., Gomez-Flores, R., & Quintanilla-Licea, R. (2023). Cytotoxic, anti-hemolytic, and antioxidant activities of *Ruta chalepensis* L. (Rutaceae) extract, fractions, and isolated compounds. *Plants*, *12*(11), 2203. https://doi.org/10.3390/plants12112203

Ferlay, J., Ervik, M., Lam, F., Laversanne, M., Colombet, M., Mery, L., Piñeros, M., Znaor, A., Soerjomataram, I., & Bray, F. (2024). *Global Cancer Observatory: Cancer Today*. International Agency for Research on Cancer. https://gco.iarc.who.int/today

Fontana, R., Sánchez-Hernández, E., Martín-Ramos, P., Martín-Gil, J., & Marconi, P. (2024). *Smilax aspera* L. leaf and fruit extracts as antibacterial agents for crop protection. *Agronomy*, *14*(2), 383. https://doi.org/10.3390/agronomy14020383

Kakouri, E., Hatziagapiou, K., Kanakis, C., Nikola, O., Lambrou, G. I., Trigas, P., Kanaka-Gantenbein, C., & Tarantilis, P. A. (2023). Cytotoxic and antioxidant activity of a chemically characterized extract of *Smilax aspera* leaves and stems. *Applied Sciences*, *13*(8), 4784. https://doi.org/10.3390/app13084784

National Cancer Institute. (2021). *Understanding cancer*. https://www.cancer.gov/about-cancer/understanding/what-is-cancer

Ntungwe, E., Domínguez-Martín, E. M., Teodósio, C., Teixidó-Trujillo, S., Armas Capote, N., Saraiva, L., Díaz-Lanza, A. M., Duarte, N., & Rijo, P. (2021). Preliminary biological activity screening of *Plectranthus* spp. extracts for the search of anticancer lead molecules. *Pharmaceuticals*, *14*(5), 402. https://doi.org/10.3390/ph14050402

Patel, S., Biswas, B., Rambabu, K., Sundaram, E., & Arya, R. (2020). Pharmacognostical studies of *Smilax aspera* Linn.—A herbal drug. *Indian Journal of Research in Homoeopathy*, *14*(4), 260. https://doi.org/10.4103/ijrh.ijrh_13_20

Quintanilla-Licea, R., Rodríguez-Garza, N. E., Torres-Hernández, Á. D., Verde-Star, M. J., & Elizondo-Luévano, J. H. (2023). Actividad citotóxica, antioxidante y antihemolítica del extracto metanólico de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, *8*(1), 957–964. https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.121

Rashidi, M., Seghatoleslam, A., Namavari, M., Amiri, A., Fahmidehkar, M. A., Ramezani, A., Eftekhar, E., Hosseini, A., Erfani, N., & Fakher, S. (2017). Selective cytotoxicity and apoptosis-induction of *Cyrtopodion scabrum* extract against digestive cancer cell lines. *International Journal of Cancer Management, 10*(5). https://doi.org/10.5812/ijcm.8633

Rodríguez-Garza, N. E., Quintanilla-Licea, R., Romo-Sáenz, C. I., Elizondo-Luévano, J. H., Tamez-Guerra, P., Rodríguez-Padilla, C., & Gomez-Flores, R. (2023). In vitro biological activity and lymphoma cell growth inhibition by selected Mexican medicinal plants. *Life, 13*(4), 958. https://doi.org/10.3390/life13040958

Rodríguez-Garza, N. E., Molina-Garza, Z. J., Galaviz-Silva, L., & Quintanilla-Licea, R. (2019). Evaluación *in vitro* de extractos de plantas medicinales contra *Trypanosoma cruzi*, agente causal de la enfermedad de Chagas. *Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química, 5*(5), 677–685. http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/7893/Evaluacion_in_vitro_de_extractos_de_plantas_medici-nales_2019.pdf?sequence=1

Wang, W., Xu, J., Fang, H., Li, Z., & Li, M. (2020). Advances and challenges in medicinal plant breeding. *Plant Science, 298*, 110573. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110573

Zhang, Q. Y., Wang, F. X., Jia, K. K., & Kong, L. D. (2018). Natural product interventions for chemotherapy and radiotherapy-induced side effects. *Frontiers in Pharmacology, 9*, Article 1253. https://doi.org/10.3389/fphar.2018.01253

Actividad citotóxica de extractos de *Parthenium hysterophorus* en células SiHa

Brisa Carmona Zamora[3], Yaraset López Lorenzo, Gisela Gutiérrez Iglesias, María Elena Sánchez Mendoza

Resumen

El cáncer cervicouterino es un importante problema de salud pública a nivel mundial debido a su elevada incidencia y mortalidad. A pesar de que existen tratamientos como la cirugía, radioterapia y quimioterapia, estos pueden generar efectos adversos importantes y afectar la calidad de vida de las pacientes, por ello resulta necesario investigar nuevas alternativas terapéuticas. *Parthenium hysterophorus* es una planta medicinal con evidencia de actividad antitumoral, por lo que la presente propuesta tuvo como objetivo evaluar la actividad citotóxica de extractos de *P. hysterophorus* sobre la línea celular SiHa. A partir de tallos de *P. hysterophorus* se prepararon extractos de hexano, diclorometano y metanol mediante el proceso de maceración. Cada disolvente estuvo en contacto con el material vegetal durante 72 h a temperatura ambiente. La actividad citotóxica de *P. hysterophorus* se determinó en células SiHa. Las células fueron sembradas en placas de 96 pozos e incubadas con los diferentes extractos a las concentraciones de 3, 10, 30 y 100 µg/mL durante 72 horas. Transcurrido ese tiempo se determinó la actividad biológica con la técnica de cristal violeta, se tomaron lecturas de absorbancias a 570 nm en un lector de placas, y se calculó la viabilidad celular. Los resultados indicaron que el extracto de diclorometano fue el más activo (75 ± 2.5% de inhibición). Se concluye que la planta ejerce actividad citotóxica en la línea celular SiHa.

Palabras clave: *Parthenium hysterophorus*, actividad citotóxica, cáncer cervical.

Abstract

Cervical cancer is a major global public health problem due to its high incidence and mortality. Although treatments such as surgery, radiotherapy, and chemotherapy exist, these can cause significant adverse effects and impact patients' quality of life; therefore, it is necessary to investigate new therapeutic alternatives. *Parthenium hysterophorus* is a medicinal plant with evidence of antitumor activity, so this study aimed to evaluate the

[3] Escuela Superior de Medicina. Instituto Politécnico Nacional. Salvador Díaz Mirón esq. Plan de San Luis S/N, Miguel Hidalgo, Casco de Santo Tomas, 11340 Ciudad de México, CDMX. 23661187@uagro.mx; yarlop_25@outlook.com; iglesiasgg@yahoo.com; marelen20.1@gmail.com

cytotoxic activity of *P. hysterophorus* extracts on the SiHa cell line. Extracts of hexane, dichloromethane, and methanol were prepared from *P. hysterophorus* stems through maceration. Each solvent was in contact with the plant material for 72 h at room temperature. The cytotoxic activity of *P. hysterophorus* was determined in SiHa cells. The cells were seeded in 96-well plates and incubated with the different extracts at concentrations of 3, 10, 30, and 100 µg/mL for 72 hours. After this time, biological activity was determined using the crystal violet technique, absorbance readings were taken at 570 nm on a plate reader, and cell viability was calculated. The results indicated that the dichloromethane extract was the most active (75 ± 2.5% inhibition). It is concluded that the plant exerts cytotoxic activity on the SiHa cell line.

Keywords: *Parthenium hysterophorus*, cytotoxic activity, cervical cancer.

Introducción

Entre los principales tipos de cáncer que afectan a las mujeres, el cáncer cervicouterino ocupa el cuarto lugar (Alfaro Jiménez, *et al*., 2025). Existen múltiples factores de riesgo que inducen su progresión, destacando el estado inmunológico, antecedentes asociados a actividad sexual como comenzar relaciones sexuales a edad temprana, tener múltiples parejas sexuales, antecedentes de infecciones de transmisión sexual, la edad temprana en el primer embarazo, (Juárez-González, *et al*., 2020) el uso de anticonceptivos hormonales, el tabaquismo (WHO, 2025) e infección con tipos oncogénicos del virus del papiloma humano (VPH) (Alfaro Jiménez, *et al*., 2025). Se han identificado más de 118 diferentes tipos de VPH y 12 han sido clasificados como carcinógenos (de Sanjose*, et al*., 2010).

A lo largo de los años ha existido un gran interés por identificar los tipos prevalentes de VPH en el cáncer cervicouterino por lo que se han realizado diversos estudios al respecto, como el realizado por de Sanjose*, et al*., 2010, que incluyó muestras de 38 países, y sus resultados reportaron que 8 tipos de VPH (16,18,31,33,35,45,52, y 58) contribuyen al cáncer cervical invasivo, destacando entre ellos los tipos 16,18, y 45 por su papel predominante. En nuestro país de igual forma se han realizado estudios como el de Juárez-González, *et al*. 2020, que se llevó a cabo en dos hospitales del IMSS, donde los investigadores encontraron que los VPH de mayor prevalencia fueron los tipos 16, 66, 52 y 51. Destacando el tipo 16 con una prevalencia del 45.4%.

Actualmente, se pueden emplear diversas terapias en el tratamiento del cáncer, como cirugía, radioterapia y quimioterapia. Sin embargo, estos pueden generar efectos adversos importantes. Por ello, resulta necesario investigar nuevas alternativas terapéuticas. Entre esas

alternativas destacan los productos naturales, se estima que más del 60 % de los medicamentos utilizados actualmente para el tratamiento del cáncer derivan directa o indirectamente de metabolitos naturales o de compuestos inspirados en éstos, lo que evidencia el enorme potencial farmacológico de las plantas medicinales para el desarrollo de nuevas estrategias terapéuticas (Newman y Cragg, 2020).

La planta motivo de estudio en el presente trabajo *Parthenium hysterophorus*, que pertenece a la familia Asteraceae, ha demostrado que ejerce actividad citotóxica frente a diferentes líneas celulares de cáncer de ovario, pulmón y colon (Kumar, *et al*., 2014), así como de cáncer cervicouterino (Alfaro Jiménez, *et al*., 2025), respecto este tipo de cáncer se ha evaluado en células HeLa, que contienen el genotipo de VHP-18. Por lo que con la finalidad de ampliar el conocimiento sobre el potencial de *P. hysterophorus* en el tratamiento del cáncer cervicouterino y considerando que en la población mexicana se ha identificado que el genotipo 16 tiene alta prevalencia (Juárez-González, *et al*. 2020), el objetivo de este trabajo fue evaluar la actividad citotóxica de extractos de *P. hysterophorus* sobre la línea celular SiHa, que son células que contienen el VPH-16.

Materiales y Métodos

Reactivos químicos

Todos los reactivos utilizados fueron adquiridos de Sigma-Aldrich.

Material vegetal

En julio de 2025, se colectó la planta *Parthenium hysterophorus* en Suchiapa, Chiapas. Un ejemplar fue identificado en el Departamento de Flora del Herbario Chiapas.

Preparación de extractos de *Parthenium hysterophorus*

Se prepararon tres extractos de *Parthenium hysterophorus*, utilizando el proceso de maceración. Para ello, se introdujeron 367.8g del material vegetal (tallos) en un matraz Erlenmeyer. Posteriormente, se añadió hexano como disolvente (volumen total de 1840 mL) y se dejó en reposo durante tres días a temperatura ambiente. Transcurrido el tiempo de maceración, la mezcla se filtró con el fin de separar el extracto líquido del material vegetal. El filtrado se concentró en un rotaevaporador, el cual se ajustó a una temperatura de 69 °C y se mantuvo hasta lograr la evaporación total del hexano y la obtención del extracto concentrado. Al término de la extracción, el material vegetal se dejó secar completamente y

se le adicionó el disolvente de diclorometano, y finalmente metanol. El procedimiento se realizó de manera similar a lo descrito para hexano.
En el caso del diclorometano se empleó un volumen de 1940 mL durante la maceración y se concentró a una temperatura de 40 °C, para el metanol, se empleó un volumen final de 1715 mL y se concentró a una temperatura de 65 C .

Ensayo de citotoxicidad en células SiHa

Para la evaluación citotóxica se utilizaron células SiHa previamente cultivadas en el laboratorio. Las células fueron sembradas en placas de 96 pozos e incubadas con los diferentes extractos de *P. hysterophorus* a las concentraciones de 3, 10, 30 y 100 µg/mL durante 72 horas. Transcurrido ese tiempo se realizó un lavado inicial a la placa con una solución de PBS 1X (100 µL por pozo), posteriormente se fijó con 100 µL glutaraldehído al 1.1%, dejando incubar por 20 min. Luego se tiñó con 50 µL de una solución de cristal violeta al 0.5% durante 20 min; transcurrido el tiempo, la placa se lavó con agua de grifo hasta dejar de observar un color azul. Finalmente, a cada uno de los pozos se les agregó 100 µL ácido acético al 10% para solubilizar el cristal violeta retenido en el núcleo de la célula. Se determinaron las absorbancias de las muestras a 570 nm mediante un lector de microplacas de Elisa, modelo W20 marca EMPSUN, China. La viabilidad celular se calculó tomando como referencia el control sin tratamiento, utilizando la fórmula 1. Todos los experimentos se realizaron por triplicado.

$$\%\ de\ viabilidad = \frac{absorbancia\ tratado}{absorbancia\ de\ control}\ x\ 100 \qquad (1)$$

Estadística

Los datos se graficaron como la media ± EEM. Los resultados se analizaron utilizando un análisis de varianza seguido de la prueba de Tukey. Se consideró significativo un valor de $p \leq 0.05$.

Resultados y discusión

P. hysterophorus es una planta que se utiliza en la medicina tradicional de diversos países para tratar enfermedades inflamatorias, cutáneas y neurológicas, así como problemas del sistema reproductor femenino, entre otras (Kummar 2013). Algunas de esas actividades han

sido sustentadas científicamente, como es el caso de su potencial citotóxico en diferentes líneas celulares de cáncer (Kumar, *et al*., 2014). En particular para el cáncer cervicouterino se ha evaluado un extracto acuoso a partir de las flores (Alfaro Jiménez, *et al*., 2025), en la línea celular HeLa (VPH-18), lo que motivó el interés por determinar su potencial citotóxico en la línea celular SiHa (VPH-16), dado que se ha reportado que en la población mexicana este genotipo fue identificado con alta prevalencia en pacientes con cáncer cervicouterio (Juárez-González, *et al*. 2020).

Las muestras de flores previamente estudiadas por Alfaro Jiménez, *et al*., 2025, fueron adquiridas en mercados locales de Saltillo, Coahuila, México y las muestras del presente trabajo se colectaron previamente en Suchiapa, un municipio del estado de Chiapas. Considerando que las diferencias geográficas de la colecta pueden influir en la presencia de los metabolitos secundarios presentes en una planta debido a las condiciones climáticas extremas (García *et al*., 2003 y Cazaña-Martínez, *et al*., 2004) como inundaciones, sequía, radiación solar, invasión de plagas, etc, en esta investigación se decidió comenzar con la fase inicial de un estudio biodirigido, utilizando tallos de *P. hysterophorus*. Para ello el material vegetal se sometió a una extracción vía maceración con tres disolventes de distinta polaridad en forma consecutiva. Lo recomendable es comenzar con un disolvente no polar y continuar con una serie de disolventes de mayor polaridad, obteniendo así diversos extractos a medida que aumenta la polaridad (Sharma y Gupta, 2015). En este caso se seleccionaron los disolventes de hexano, diclorometano y metanol, los rendimientos obtenidos se muestran en la tabla 1. El mayor rendimiento se obtuvo al preparar el extracto metanólico, mientras que los extractos de hexano y de diclorometano tuvieron un rendimiento similar.

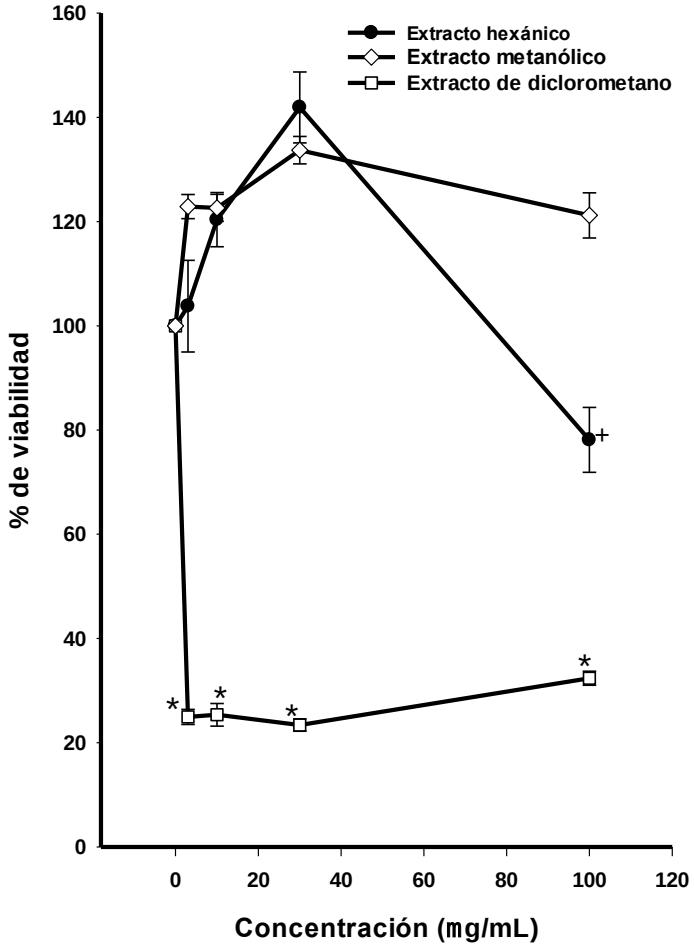
Tabla 1. Rendimiento de los extractos a partir de tallos de *P. hysterophorus*

EXTRACTO	RENDIMIENTO (%)
Hexano	0.73
Diclorometano	0.7
Metanol	5.3

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, se determinó la citotoxicidad de los extractos en células SiHa, utilizando la técnica de cristal violeta, los resultados se muestran en la gráfica 1, como se puede apreciar el extracto de metanol fue inactivo ya que permitió la proliferación celular, el extracto de hexano a bajas concentraciones de igual forma permitió la proliferación celular y solo a la concentración de 100 µg/mL disminuyó la viabilidad en un 21.8%, en cambio el extracto de

diclorometano fue el único extracto activo y ejerció una inhibición de la proliferación celular de forma no dependiente de la concentración. Desde la concentración de 3 µg/mL inhibió un 75% y esta inhibición se mantuvo prácticamente estable hasta la concentración de 100 µg/mL donde inhibió un 67%. Estos resultados indican que el extracto de diclorometano de *P. hysterophorus* ejerce una actividad citotóxica considerable en células SiHa, lo cual es un dato muy importante ya que estas células contienen el genotipo del VPH-16, que es de alta prevalencia en población mexicana.



Gráfica 1. Actividad citotóxica de extractos de *Parthenium hysterophorus* en células SiHa. *p<0.05, respecto al extracto de hexano y de metanol, $^{+}$p<0.05, respecto al extracto de

metanol y de diclorometano. Cada barra representa el promedio ± EEM (n = 3). Fuente: Elaboración propia.

En estudios futuros se trabajará en la purificación cromatográfica de dicho extracto con la finalidad de identificar al o los compuestos responsables de la actividad. Estudios fitoquímicos realizados con las partes aéreas *P. hysterophorus* han reportado la presencia de diversos compuestos químicos como lactonas sesquiterpénicas, pseudoguaianólidos, flavonoides, ácidos fenólicos, aceites volátiles, alcaloides, lípidos, esteroides, esteroles, proteínas, taninos y elementos metálicos (Kaur *et al*., 2021). Pero tomando en cuenta que el disolvente de diclorometano permite extraer compuestos del tipo de terpenoides, flavonoides como flavonas, flavonoles, flavanonas y otros componentes de baja polaridad (Sharma y Gupta R, 2015), probablemente los compuestos que se identifiquen en este extracto sean de ese tipo.

En el estudio realizado por Alfaro Jiménez, *et al*., 2025 la obtención de la planta se realizó como se mencionó anteriormente en los mercados locales por lo que se asume la colecta fue en el mismo estado del norte de México (Coahuila) y las muestras estudiadas en el presente trabajo en el sur de México (Chiapas), lo que sugiere que los compuestos activos se encuentran presentes independientemente de la región geográfica. Otro punto importante de resaltar es que, aunque Alfaro Jiménez, y cols., 2025 utilizaron flores y en el presente trabajo se emplearon tallos, los resultados sugieren que tanto los tallos como las flores contienen metabolitos activos en células de cáncer cervicouterino, pero queda pendiente evaluar flores y otras partes de la planta, para poder establecer si en alguna parte en particular se encuentran en mayor cantidad los compuestos activos en la línea celular SiHa.

Conclusiones

El extracto de diclorometano de la planta *Parthenium hysterophorus* inhibió significativamente la proliferación celular de células SiHa, por lo que contiene compuestos con actividad citotóxica sobre esta línea celular.

Literatura citada

Revistas

Alfaro Jiménez, M. Á., Aguilar Vega, H. A., Cerda López, P. G., Zugasti Cruz, A., Ascacio Valdés, J. A., Cobos Puc, L. E. & Sierra Rivera, C. A. (2025). Antioxidant Activity of Plant Extracts and the Enhance of Their Cytotoxic Effects in Combination with Cisplatin on HeLa Cell Line. *Polish Journal of Environmental Studies*, 34(3), 2233–2251. https://doi.org/10.15244/pjoes/185347

Cazaña-Martínez, Y., González-Lavaut, J.A., Prieto-González, S., Molina-Torres J., González Guevara, J., & Urquiola-Cruz, A. (2004). Evaluación fitoquímica preliminar de tres especies cubanas de Erythroxylum. *Acta Farmacéutica Bonaerense*, 23: 193-197. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/6639

de Sanjose, S., Quint, W. G., Alemany, L., Geraets, D. T., Klaustermeier, J. E., Lloveras, B., Tous, S., Felix, A., Bravo, L. E., Shin, H. R., Vallejos, C. S., de Ruiz, P. A., Lima, M. A., Guimera, N., Clavero, O., Alejo, M., Llombart-Bosch, A., Cheng-Yang, C., Tatti, S. A., Kasamatsu, E., … Retrospective International Survey and HPV Time Trends Study Group (2010). Human papillomavirus genotype attribution in invasive cervical cancer: a retrospective cross-sectional worldwide study. *The Lancet. Oncology*, 11(11): 1048–1056. https://doi.org/10.1016/S1470-2045(10)70230-8

García, D.E., Ojeta, F., & Montejo, I. (2003). Evaluación de los principals factores que influyen en la composición fitoquímica de Morus alba (Linn). I. Análisis cualitativo de metabolitos secundarios. *Pastos y forrajes,* 26, 335-346.

Juárez-González, K., Paredes-Cervantes, V., Martínez-Salazar, M., Gordillo-Rodríguez, S., Vera-Arzave, C., Martínez-Meraz, M., Sánchez-Suárez, P., & Vázquez-Vega, S. (2020). Prevalencia del virus del papiloma humano oncogénico en pacientes con lesión cervical. *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*. *58*(3), 243-249.

Kaur, L., Malhi, D. S., Cooper, R., Kaur, M., Sohal, H. S., Mutreja, V., & Sharma, A. (2021). Comprehensive review on ethnobotanical uses, phytochemistry, biological potential and toxicology of Parthenium hysterophorus L.: A journey from noxious weed to a therapeutic medicinal plant. *Journal of ethnopharmacology*, *281*, 114525. https://doi.org/10.1016/j.jep.2021.114525

Kumar, S., Chashoo, G., Saxena, A. K., & Pandey, A. K. (2013). *Parthenium hysterophorus*: a probable source of anticancer, antioxidant and anti-HIV agents. *BioMed research international*, *2013*, 810734. https://doi.org/10.1155/2013/810734

Kumar, S., Pandey, S., & Pandey, A. K. (2014). In vitro antibacterial, antioxidant, and cytotoxic activities of Parthenium hysterophorus and characterization of extracts by LC-MS analysis. *BioMed research international*, 2014, 495154. https://doi.org/10.1155/2014/495154

Newman, D. J., & Cragg, G. M. (2020). Natural Products as Sources of New Drugs over the Nearly Four Decades from 01/1981 to 09/2019. *Journal of natural products*, *83*(3), 770–803. https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.9b01285

Sharma, S.B., & Gupta R. (2015). Drug development from natural resource: a systematic approach. *Mini-reviews in Medicinal Chemistry*, *15*(1), 52-57. https://doi.org/10.2174/1389557515011502241605l8

Referencia electrónica

World Health Organization, 2026. Cervical cancer. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cervical-cancer. [Fecha de acceso: 14-08-2026].

Citotoxicidad y genotoxicidad de extractos etanólicos de tres especies vegetales de uso etnomédico en la Sierra Negra de Puebla, México

Velázquez-Vázquez, Guadalupe[4], Aragón-Sánchez, Miguel, López-Olguín, Jesús Francisco, Ortega Martínez, Luis Daniel[5]

Resumen

La validación de la seguridad de las plantas medicinales tradicionales es un requisito frecuentemente descuidado en la investigación etnofarmacológica, en particular plantas utilizadas ampliamente por comunidades Nahuas de la Sierra Negra de Puebla, México. El objetivo fue evaluar el efecto citotóxico y genotóxico de extractos etanólicos (1% p/v) de tres especies *Citrus reticulata, Alnus acuminata* y *Ludwigia octovalvis* mediante el bioensayo crónico de *Allium sativum L.*, incluyendo control negativo (agua destilada estéril) y control positivo (colchicina, 0.05–0.1%) (cuatro repeticiones; 1000 células por repetición). Se cuantificó el índice mitótico y la frecuencia de anormalidades nucleares (micronúcleos, yemas nucleares, binucleadas, núcleos lobulados/irregulares) y de daño nuclear avanzado (picnosis, cariorrexis, cariolisis), analizados con Kruskal-Wallis y post hoc de Dunn. El índice mitótico disminuyó progresivamente del control negativo (9.85 ± 0.70%) al control positivo (3.35 ± 0.31%), con *Citrus reticulata* (8.68 ± 0.35%), *Alnus acuminata* (6.67 ± 0.35%) y *Ludwigia octovalvis* (4.28 ± 0.35%) en posiciones intermedias (H = 18.07; gl = 4; p = 0.0012). *Ludwigia octovalvis* mostró el mayor riesgo entre los extractos, cercano al control positivo; *Citrus reticulata* mostró el menor efecto. Con ambos controles confirmados experimentalmente, estos hallazgos validan el gradiente citotóxico-genotóxico y constituyen la primera evidencia de seguridad citogenética para especies priorizadas por consenso etnobotánico en la Sierra Negra.

Palabras clave: genotoxicidad; citotoxicidad; *Allium sativum*; etnobotánica; Sierra Negra.

[4] Centro de Agroecología, Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), 4 Sur 104, Centro Histórico, 72000 Puebla, Pue., México. anyvelaz77@gmail.com, marasan@correo.buap.mx, jesus.lopezol@correo.buap.mx

[5] Universidad Tecnológica de Tehuacán, Prol. de la 1 sur No. 1101, Barrio Cuayuca, 75859 Tehuacán, Pue., México

Abstract

Validating the safety of traditional medicinal plants is a requirement frequently overlooked in ethnopharmacological research, particularly for plants widely used by Nahua communities of the Sierra Negra of Puebla, Mexico. This study aimed to evaluate the cytotoxic and genotoxic effects of ethanolic extracts (1% w/v) of three species, Citrus reticulata, Alnus acuminata (Élite), and Ludwigia octovalvis (Cone-xibitl), using the chronic Allium sativum L. bioassay, including a negative control (sterile distilled water) and a positive control (colchicine, 0.05-0.1%) (four replicates; 1000 cells per replicate). Mitotic index and the frequency of nuclear abnormalities (micronuclei, nuclear buds, binucleated cells, lobed/irregular nuclei) and advanced nuclear damage (pyknosis, karyorrhexis, karyolysis) were quantified and analyzed with Kruskal-Wallis and Dunn post hoc tests. Mitotic index decreased progressively from the negative control (9.85 ± 0.70%) to the positive control (3.35 ± 0.31%), with Citrus reticulata (8.68 ± 0.35%), Alnus acuminata (6.67 ± 0.35%), and Ludwigia octovalvis (4.28 ± 0.35%) at intermediate positions ($H = 18.07$; $df = 4$; $p = 0.0012$). Ludwigia octovalvis showed the highest risk among the extracts, close to the positive control; Citrus reticulata showed the mildest effect. With both controls experimentally confirmed, these findings validate the observed cytotoxic-genotoxic gradient and constitute the first cytogenetic safety evidence for medicinal species prioritized by ethnobotanical consensus in the Sierra Negra.

Keywords: genotoxicity; cytotoxicity; Allium sativum; ethnobotany; Sierra Negra.

Introducción

La Organización Mundial de la Salud reconoce que la medicina tradicional es la fuente primaria o complementaria de atención a la salud para entre el 40 y el 90% de la población en la mayoría de sus Estados miembros, y ha establecido en su Estrategia Global de Medicina Tradicional 2025–2034 el compromiso de generar evidencia científica que respalde su integración segura a los sistemas de salud (OMS-OPS, 2023). Sin embargo, la validación científica de las prácticas fitoterapéuticas tradicionales se ha concentrado desproporcionadamente en la demostración de eficacia y actividad biológica, mientras que la evaluación sistemática de su seguridad citogenética permanece como una brecha de

investigación relevante, particularmente en regiones donde el uso de plantas medicinales sustituye con frecuencia al tratamiento biomédico convencional.

El bioensayo de Allium es el sistema in vivo estandarizado más utilizado para evaluar preliminarmente la citotoxicidad y genotoxicidad de extractos vegetales, por la alta tasa proliferativa y sensibilidad de sus células meristemáticas a agentes clastogénicos y aneugénicos (Bonciu et al., 2018; Banti & Hadjikakou, 2019; Torres-Bugarín et al., 2026). Pese al interés etnofarmacológico creciente en las especies medicinales de la Sierra Negra, escasos estudios han evaluado el perfil citogenotoxicológico de especies utilizadas ampliamente en medicina tradicional. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto citotóxico y genotóxico de extractos etanólicos de *Alnus acuminata*, *Ludwigia octovalvis y Citrus reticulata* mediante el bioensayo crónico de *Allium sativum L*., incluyendo controles negativo (agua destilada estéril) y positivo (colchicina) que permiten interpretar el gradiente observado en términos toxicológicos absolutos, generando la primera evidencia de seguridad citogenética para especies priorizadas por consenso etnobotánico en la Sierra Negra de Puebla.

Materiales y métodos

El estudio se realizó con material vegetal (hojas) colectado en cuatro localidades Nahuas de la Sierra Negra de Puebla, México (18°00′–18°30′ N, 97°00′–97°30′ O; 800–3,000 m s.n.m.), las cuales fueron identificadas taxonómicamente en el Herbario del Jardín Botánico de la BUAP (HUAP). Se seleccionaron tres especies con base en los índices etnobotánicos VU, FCI y NF calculados en un estudio previo: *Alnus acuminata Kunth* (Élite), *Ludwigia octovalvis* (Jacq.) P.H. y *Citrus reticulata*. Se empleó un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones biológicas por tratamiento; la unidad experimental fue un diente de ajo (*Allium sativum L*.) viable, homogéneo en tamaño y con raíces activas. Los extractos se obtuvieron mediante extracción Soxhlet del material vegetal seco y pulverizado, empleando etanol como solvente; el extracto resultante se concentró a sequedad en rotavapor (presión reducida, ~40 °C) y se resuspendió en agua destilada estéril hasta alcanzar la concentración de trabajo de 1% p/v (10 mg/mL), filtrando posteriormente con papel estéril o membrana de 0.45 µm.Se incluyó un control negativo (agua destilada estéril) y un control positivo (colchicina, 0.05–0.1%), preparados y expuestos bajo las mismas condiciones que los

extractos, indispensables para distinguir el efecto propio del manejo experimental de la respuesta citotóxica/genotóxica inducida por cada tratamiento y para calibrar la magnitud absoluta del gradiente observado. Los dientes de ajo, previamente desinfectados y pre-germinados hasta obtener raíces de 1–2 cm, se expusieron durante 7 días a 25 ± 2 °C a cada tratamiento, con renovación cada 48 h. Tras la exposición, los 1–2 mm apicales de las raíces se fijaron en Carnoy frío (etanol:ácido acético 3:1, 24 h, 4 °C) y se conservaron en etanol al 70%.

Los ápices se hidrolizaron con HCl 1 N (60 °C, 5 min) y se tiñeron mediante reacción de Feulgen-Schiff o, alternativamente, con aceto-orceína/aceto-carmín al 2%, aplicando la técnica de squash. Todas las laminillas se codificaron para conteo ciego. En cada repetición se cuantificaron 1000 células meristemáticas para registrar el índice mitótico (porcentaje de células en profase, metafase, anafase y telofase) y la frecuencia de anormalidades nucleares micronúcleos, yemas nucleares, células binucleadas y núcleos lobulados/irregulares y de daño nuclear avanzado picnosis, cariorrexis y cariolisis, siguiendo los criterios morfológicos estandarizados para el bioensayo de Allium (Bonciu et al., 2018; Animasaun et al., 2024; Torres-Bugarín et al., 2026). Las variables se expresaron como eventos por mil células (‰), lo que facilita la comparación de eventos de baja frecuencia.
La normalidad de los residuales se evaluó mediante la prueba de Shapiro-Wilk; dado su incumplimiento en la mayoría de las variables ($p < 0.05$), las diferencias entre los cinco grupos (control negativo, tres extractos y control positivo) se analizaron mediante la prueba de Kruskal-Wallis con comparaciones post hoc de Dunn. Adicionalmente, dado que las anormalidades nucleares son conteos sobre un denominador fijo de 1000 células, se ajustó un modelo lineal generalizado de tipo Poisson/quasi-Poisson (offset = log[1000], corrección de continuidad de 0.5 eventos) para estimar razones de prevalencia (RP) e intervalos de confianza al 95% frente al control negativo, categoría de referencia natural del bioensayo. La significancia estadística se estableció en $\alpha = 0.05$; los análisis se realizaron en R (R Core Team, 2024).

Resultados y discusión

El índice mitótico disminuyó de forma progresiva y significativa a lo largo del gradiente control negativo > *Citrus reticulata* > *Alnus acuminata* (Élite) > *Ludwigia octovalvis* (Cone-

xibitl) > control positivo (Kruskal-Wallis H = 18.07, gl = 4, p = 0.0012) (Cuadro 1, Figura 1). Las comparaciones post hoc de Dunn (ajuste de Holm) confirmaron diferencia significativa entre el control negativo y el control positivo (p = 0.0017), entre el control negativo y *Ludwigia octovalvis* (p = 0.0398), y entre *Citrus reticulata* y el control positivo (p = 0.0307).

Cuadro 1. Índice mitótico (%) por tratamiento en el bioensayo crónico de Allium sativum L. (media ± DE, n = 4 repeticiones biológicas; 1000 células por repetición).

Tratamiento	Índice mitótico (%)	Cambio vs. control negativo	Valor de p*
Control negativo (agua) (ref.)	9.85 ± 0.70	—	—
Citrus reticulata	8.68 ± 0.35	−11.9%	1.000
Alnus acuminata (Élite)	6.67 ± 0.35	−32.3%	0.340
Ludwigia octovalvis (Cone-xibitl)	4.28 ± 0.35	−56.6%	0.0398
Control positivo (colchicina)	3.35 ± 0.31	−66.0%	0.0017

** Prueba de Dunn (ajuste de Holm) frente al control negativo. Fuente: elaboración propia con datos experimentales.*

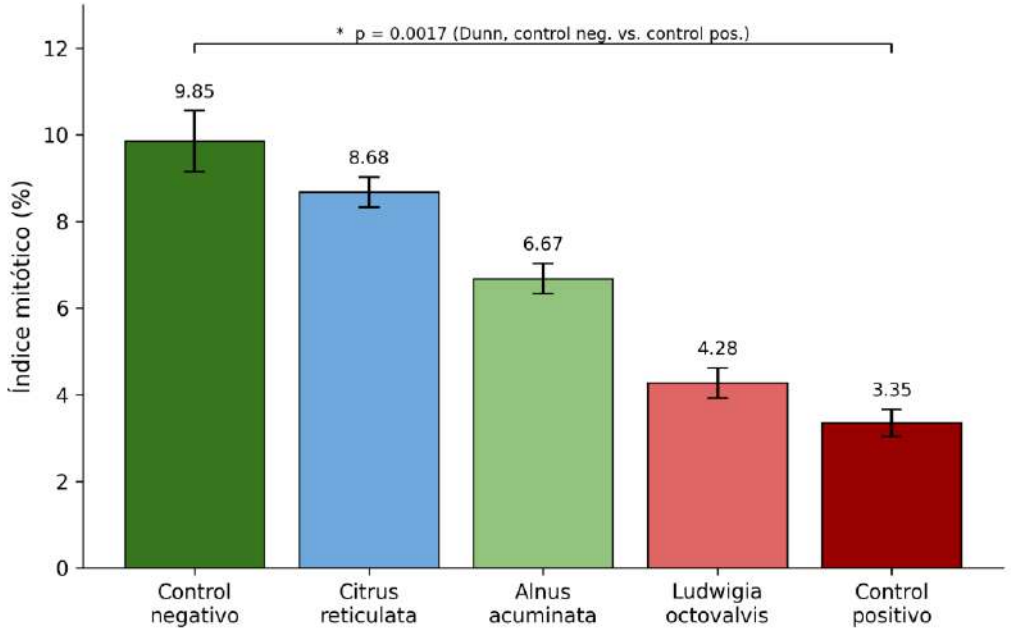


Figura 1. Índice mitótico (%) por tratamiento (media ± DE). Asterisco: diferencia significativa entre control negativo y control positivo (prueba de Dunn, $p < 0.05$).
Fuente: elaboración propia.

De forma recíproca, la frecuencia de anormalidades nucleares aumentó a lo largo del mismo gradiente (Cuadro 2, Figura 2). El daño nuclear avanzado (picnosis, cariorrexis, cariolisis) mostró el mismo patrón, con razones de prevalencia de 2.92 (Citrus reticulata) a 18.62 (control positivo) respecto al control negativo. Es notable que el control positivo (colchicina) presentó, de manera consistente, la mayor razón de prevalencia de todos los grupos incluso por encima de *Ludwigia octovalvis*, congruente con su mecanismo aneugénico bien caracterizado de inhibición del huso mitótico (Bonciu et al., 2018). La correlación de Spearman entre índice mitótico y anormalidades celulares fue negativa y muy alta ($\rho = -0.955$, $p < 0.001$), confirmando la coherencia interna del gradiente citotóxico-genotóxico a lo largo de los cinco grupos.

Cuadro 2. Frecuencia de anormalidades nucleares (‰, media ± DE) por tratamiento en el bioensayo crónico de *Allium sativum* L.

Tratamiento	Micronúcleos	Yemas nucleares	Binucleadas	Núcleos lobulados/irregulares
Control negativo (agua)	0.62 ± 0.25	0.22 ± 0.10	0.28 ± 0.10	0.57 ± 0.15
Citrus reticulata	1.65 ± 0.31	1.43 ± 0.22	1.10 ± 0.18	1.77 ± 0.28
Alnus acuminata (Élite)	3.45 ± 0.31	3.62 ± 0.22	2.20 ± 0.18	4.48 ± 0.28
Ludwigia octovalvis (Cone-xibitl)	8.25 ± 0.31	7.92 ± 0.22	5.10 ± 0.18	9.47 ± 0.28
Control positivo (colchicina)	10.07 ± 0.94	9.07 ± 0.15	8.28 ± 0.98	11.90 ± 0.62

Fuente: elaboración propia con datos experimentales.

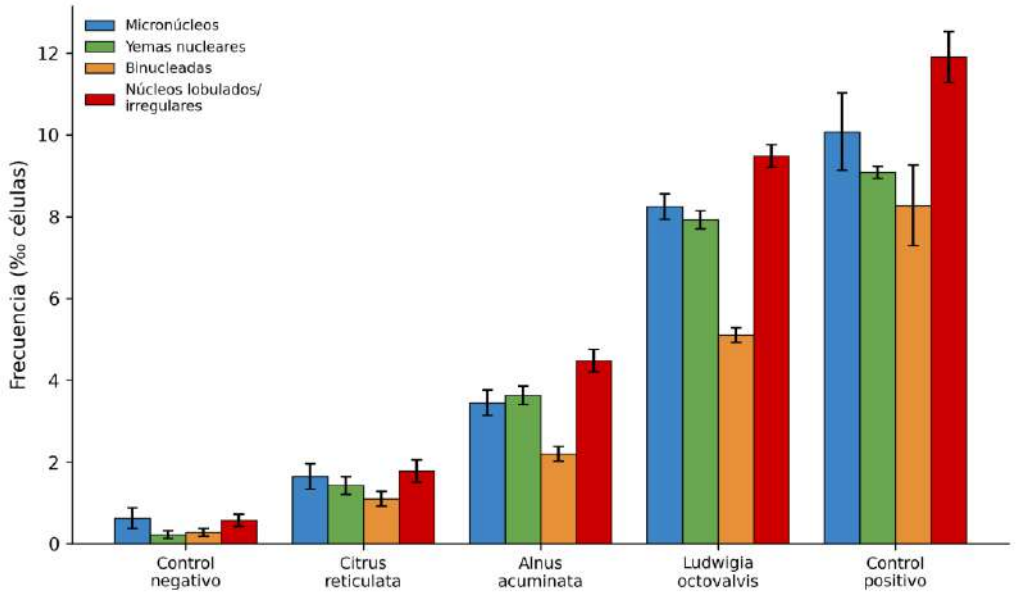


Figura 2. Frecuencia de anormalidades nucleares (‰) por tratamiento (media ± DE).
Fuente: elaboración propia.

Los perfiles fitoquímicos documentados previamente para estas especies (Velázquez-Vázquez et al., en preparación) ofrecen un marco interpretativo para el gradiente observado. *Alnus acuminata* (Élite), con perfil rico en esteroides/triterpenos, flavonoides y alcaloides, presentó un efecto citogenético moderado, significativamente distinto del control negativo

pero notablemente menor que el de Ludwigia octovalvis, compatible con cierta modulación por compuestos con actividad antioxidante documentada para el género (González-Garza et al., 2018). *Ludwigia octovalvis* (Cone-xibitl), con el perfil fitoquímico más diverso (alcaloides, flavonoides, terpenos, cumarinas y saponinas; Rosas-Piñón et al., 2012; García-Bautista et al., 2021), mostró el mayor efecto citotóxico y genotóxico entre los extractos evaluados, con razones de prevalencia que se aproximan a las del control positivo, lo que plantea la necesidad de precaución respecto a su uso tradicional continuo pese a su Nivel de Fidelidad del 100% documentado para afecciones de piel y cicatrización. *Citrus reticulata*, aunque significativamente distinto del control negativo en todas las variables, mostró consistentemente el efecto más leve entre los tres extractos, congruente con su amplia caracterización antioxidante en la literatura.

La inclusión de ambos controles permite ahora una interpretación toxicológica absoluta: ningún extracto, ni siquiera *Citrus reticulata*, fue estadísticamente indistinguible del control negativo, lo que confirma que las tres especies inducen algún grado de estrés citogenético detectable a la concentración evaluada (1% p/v); sin embargo, el efecto de *Citrus reticulata* y *Alnus acuminata* se ubicó muy por debajo del inducido por la colchicina, mientras que *Ludwigia octovalvis* se aproximó considerablemente al control positivo, señal de que este extracto merece la mayor atención en estudios de seguridad posteriores.
Entre las limitaciones del estudio se encuentran la evaluación de una única concentración (1% p/v), lo que impide establecer relaciones dosis-respuesta, y el tamaño de muestra reducido (n = 4 por grupo), que limita la potencia de las comparaciones post hoc entre grupos adyacentes del gradiente.

Conclusiones

Con controles negativo y positivo confirmados experimentalmente, los extractos etanólicos evaluados mostraron un gradiente citotóxico y genotóxico consistente y estadísticamente significativo en el bioensayo de Allium sativum L. (control negativo > Citrus reticulata > Alnus acuminata > Ludwigia octovalvis > control positivo). Ludwigia octovalvis (Cone-xibitl) mostró el mayor riesgo citogenético entre los extractos, con valores que se aproximan a los del control positivo (razones de prevalencia de 7.2 a 16.1 respecto al control negativo), mientras que *Citrus reticulata*, mostró el perfil más favorable de los tres. Estos resultados, ahora anclados a referencias toxicológicas absolutas, constituyen la primera evidencia de

seguridad citogenética para especies priorizadas por consenso etnobotánico en la Sierra Negra de Puebla y complementan la validación biocultural previa de su uso medicinal tradicional.

Literatura citada

Libros

Lot, A., & Chiang, F. (1986). Manual de herbario: administración y manejo de colecciones, técnicas de recolección y preparación de ejemplares botánicos. México: Consejo Nacional de la Flora de México.

Revistas

Alzahrani, M. M., Alrefaei, A. F., & Shaikhaldein, H. O. (2025). Genotoxic analysis of aqueous extract of Aerva javanica leaves on Allium cepa: Cytogenetic and molecular assessment. Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences. https://doi.org/10.1007/s43994-025-00248-z

Animasaun, D. A., Adedibu, P. A., Afolabi, S. O., Abdulkareem, K. A., Ibrahim, S., & Krishnamurthy, R. (2024). Hazard assessment and cytogenotoxic effect of different concentrations of mercury chloride sterilant using the Allium cepa assay. Discover Toxicology, 1, 2. https://doi.org/10.1007/s44339-024-00002-w

Banti, C. N., & Hadjikakou, S. K. (2019). Evaluation of genotoxicity by micronucleus assay in vitro and by Allium cepa test in vivo. Bio-protocol, 9, e3311.

Blancas, V. J. J., Caballero, J., Vite-Reyes, A., Serrano-Flores, H., Contreras-Hernández, A., & Santos-Fita, D. (2023). Useful plants of the Nahua peoples of the Sierra Negra, Puebla. En A. Casas & V. J. J. Blancas (Eds.), Ethnobotany of Mountain Regions of Mexico. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-99357-3_19

Bonciu, E., Firbas, P., Fontanetti, C. S., Wusheng, J., Karaismailoğlu, M. C., Liu, D., Menicucci, F., Pesnya, D. S., Popescu, A., Romanovsky, A. V., Schiff, S., Ślusarczyk, J., de Souza, C. P., Srivastava, A., Sutan, A., & Papini, A. (2018). An evaluation for the standardization of the Allium cepa test as cytotoxicity and genotoxicity assay. Caryologia, 71(3), 191–209. https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1503496

García-Bautista, J., Ramírez-Arriaga, E., Martínez-Hernández, N. E., & Zárate-Martínez, J. P. (2021). Ethnobotanical survey of medicinal plants used in the Huasteca Potosina region, Mexico. Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine, 17, 55. https://doi.org/10.1186/s13002-021-00481-6

González-Garza, M. T., Cárdenas-León, M., Moreno-Cuevas, J. E., & Cruz-Vega, D. E. (2018). Antiviral, antioxidant and antimicrobial activity of Alnus species: a review. Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas, 17(1), 1–11.

Kalsoom, S., et al. (2025). Analysis of synthetic food colors and food preservatives inducing genotoxicity in garlic (Allium sativum L.) root tip cells. Polish Journal of Environmental Studies.

Mohan, A. R., & Joseph, N. (2024). Cytotoxic assessment of aqueous extracts of Heliotropium keralense Sivar. & Manilal on Allium cepa root tip cells. Caryologia, 77(2), 29–36. https://doi.org/10.36253/caryologia-2436

Nicuță, D., Grosu, L., Patriciu, O.-I., Voicu, R.-E., & Alexa, I.-C. (2025). The Allium cepa model: A review of its application as a cytogenetic tool for evaluating the biosafety potential of plant extracts. Methods and Protocols, 8(4), 88. https://doi.org/10.3390/mps8040088

Rosas-Piñón, Y., Mejía, A., Díaz-Ruiz, G., Aguilar, M. I., Sánchez-Nieto, S., & Rivero-Cruz, J. F. (2012). Ethnobotanical survey and antibacterial activity of plants used in the Altiplane region of Mexico for the treatment of oral cavity infections. Journal of Ethnopharmacology, 141(3), 860–865. https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.03.020

Torres-Bugarín, O., Gómez-Ferreyra, I., Contreras-Dueñas, M., Ramos-Ibarra, M. L., Bello-Bedoy, R., Sánchez-González, A., Casillas-Figueroa, F., Ruiz-Ruiz, B., Orozco-Jiménez, K. I., & Arellano-García, M. E. (2026). The Allium cepa assay as a versatile tool for genotoxicity and cytotoxicity: Methods, applications, and comparative insight. Applied Biosciences, 5(1), 9. https://doi.org/10.3390/applbiosci5010009

Üstündağ, Ü., Macar, O., Kalefetoğlu Macar, T., Yalçın, E., & Çavuşoğlu, K. (2023). Effect of Melissa officinalis L. leaf extract on manganese-induced cyto-genotoxicity on Allium cepa L. Scientific Reports, 13, 22110. https://doi.org/10.1038/s41598-023-49699-6

Velázquez-Vázquez, G., Pérez-Armendáriz, B., Ortega-Martínez, L. D., & Nelly-Juárez, Z. (2019). Estudio etnobotánico de plantas medicinales de la Sierra Negra, Puebla, México.

Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas, 18(3), 265–276. https://doi.org/10.35588/blacpma.19.18.3.19

Velázquez-Vázquez, G., Carrasco-Carballo, A., Aragón-Sánchez, M., & López-Olguín, J. F. (en preparación). Conocimiento etnobotánico y actividad antioxidante de plantas medicinales utilizadas por comunidades indígenas de la Sierra Negra de Puebla, México. Manuscrito en preparación.

Referencias electrónicas

CBD — Convention on Biological Diversity. (2011). Nagoya Protocol on Access to Genetic Resources and the Fair and Equitable Sharing of Benefits Arising from their Utilization. Montreal: Secretariat of the CBD. [En línea], disponible en: https://www.cbd.int/abs [Fecha de acceso: 2026].

ISE — International Society of Ethnobiology. (2006). ISE Code of Ethics (with 2008 additions). [En línea], disponible en: http://www.ethnobiology.net [Fecha de acceso: 2026].

OMS-OPS. (2023). Primera Cumbre Global de Medicina Tradicional. Declaración de Gandhinagar. Ginebra: World Health Organization. [En línea], disponible en: https://www.who.int [Fecha de acceso: 2026].

R Core Team. (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. [En línea], disponible en: https://www.R-project.org/ [Fecha de acceso: 2026].

Conocimiento etnobotánico y uso tradicional de plantas medicinales en comunidades rurales del centro-sur de Chihuahua

Samantha Ontiveros Gómez[6], José Eduardo Magaña Magaña[7], Guadalupe Ontiveros Gómez[8], Lluvia Nicte-Ha Magaña Chávez[9]

Resumen

Las plantas medicinales son un recurso natural importante para la atención primaria de la salud en comunidades rurales alejadas de los centros urbanos, empero, el conocimiento tradicional sobre su uso enfrenta un riesgo de pérdida ante los cambios socioculturales. El objetivo de esta investigación consistió en documentar el conocimiento etnobotánico sobre las plantas medicinales utilizadas en las comunidades de Orinda y Buena Vista, Chihuahua, y evaluar su relevancia cultural a través de indicadores etnobotánicos. El estudio fue descriptivo con enfoque mixto mediante entrevistas semiestructuradas aplicadas a habitantes de ambas localidades mediante el método de muestreo bola de nieve. La información se analizó utilizando indicadores etnobotánicos para evaluar la importancia cultural, frecuencia de uso y consenso entre los informantes. Los resultados evidenciaron un amplio conocimiento local, una alta coincidencia en los usos medicinales y la permanencia de la transmisión familiar de estos saberes. Se concluye que este patrimonio biocultural requiere acciones de documentación, conservación y valorización para favorecer su permanencia y aprovechamiento sostenible.

Palabras clave: medicina tradicional, Orinda, Buena Vista, patrimonio biocultural.

Abstract

Medicinal plants are an important natural resource for primary healthcare in rural communities far from urban centers; however, traditional knowledge about their use faces a risk of loss due to sociocultural changes. The objective of this research was to document the ethnobotanical knowledge of medicinal plants used in the communities of Orinda and Buena

[6] Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Km 2.5 Carretera Delicias a Rosales, Campus Delicias. Delicias, Chih. México C.P.33000. Correo: p272423@uach.mx
[7] Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Km 2.5 Carretera Delicias a Rosales, Campus Delicias. Delicias, Chih. México C.P.33000. Correo: emagana@uach.mx
[8] Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Km 2.5 Carretera Delicias a Rosales, Campus Delicias. Delicias, Chih. México C.P.33000. Correo: p320314@uach.mx
[9] Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Km 2.5 Carretera Delicias a Rosales, Campus Delicias. Delicias, Chih. México C.P.33000. Correo: lmagana@uach.mx

Vista, Chihuahua, and to evaluate its cultural relevance through ethnobotanical indicators. The study was descriptive with a mixed-methods approach, using semi-structured interviews with residents of both communities through snowball sampling. The information was analyzed using ethnobotanical indicators to assess cultural importance, frequency of use, and consensus among the informants. The results showed extensive local knowledge, a high degree of agreement on medicinal uses, and the continued transmission of this knowledge through family dynamics. It is concluded that this biocultural heritage requires documentation, conservation, and valorization efforts to promote its preservation and sustainable use.

Keywords: traditional medicine, Orinda, Buena Vista, biocultural heritage.

Introducción

La etnobotánica es una disciplina esencial para el registro histórico y cultural de la relación entre las plantas y las comunidades, porque asocia los saberes ancestrales con la investigación científica permitiendo la identificación y documentación de las especies vegetales. Además, señala que con la etnobotánica se recuperan prácticas que permiten el aprovechamiento de los recursos vegetales (Gutiérrez-Murillo, 2022).

Del mismo modo, Cupido et al. (2024) mencionan que los conocimientos tradicionales sobre las plantas representan una fuente importante de información para orientar investigaciones encaminadas a la identificación de compuestos bioactivos con potencial de aplicación en la industria farmacológica.

Gutiérrez-García et al. (2024) enfatizan la relevancia de la etnobotánica como un medio para la transmisión y difusión de los saberes tradicionales, promoviendo la consciencia ambiental y la preservación de la diversidad de especies vegetales. Bajo esta perspectiva, esa transmisión del conocimiento por parte de las comunidades permite que las prácticas relacionadas con el uso de las plantas se mantengan vigentes y sean registradas mediante estudios etnobotánicos (Villanueva-Solis et al. 2020). Asimismo, Ortiz-Sánchez et al (2025) indican que los mercados tradicionales funcionan como un espacio de intercambio y abastecimiento de plantas medicinales, propiciando su disponibilidad y continuidad de los sabes asociados a su uso.

De acuerdo con la literatura existen diversas maneras de transmitir el conocimiento etnobotánico, Villanueva-Solis et al. (2020) identifican a los vendedores y médicos tradicionales como los principales transmisores de ese conocimiento, mientras que Vilaboa-

Arroniz et al (2023) destaca que la trasmisión se realiza de manera oral de generación a generación dentro de las poblaciones.

Espinoza-Rimari et al. (2021) demostraron una relación positiva entre la etnobotánica y la conciencia ambiental, con una correlación de Pearson de 0.778, lo que evidencia la integración de las prácticas y conocimientos tradicionales favoreciendo la valorización de la flora local.

Casanova-Pérez et al. (2022) indican que las plantas medicinales son de suma importancia dentro del sistema de salud comunitario porque ofrecen alternativas de uso medicinal basándose en el conocimiento ancestral. Sin embargo, este patrimonio biocultural se va perdiendo por situaciones como la migración de los jóvenes y cambios en el uso del suelo, motivo por el cual es necesario fomentar su rescate y conservación.

En consecuencia, la conservación del conocimiento se torna indispensable, ya que el uso de las plantas medicinales representa en las comunidades rurales una estrategia de salud pública y una alternativa de bajo costo para atender diversos padecimientos (Lara-Reimers et al. 2023). Sotelo-Leyva et al. (2022), exponen que tanto el aumento del precio de los medicamentos, así como los posibles efectos secundarios relacionados con su empleo, han favorecido su uso como alternativa en la atención de distintos padecimientos en las poblaciones rurales.
En el estado de Chihuahua, la flora nativa del ecosistema desértico representa una fuente relevante de especies con uso medicinal para el tratamiento de diversos padecimientos, además de significar una alternativa de bajo costo para la comunidad (Olivas-Sánchez et al. 2020). Sin embargo, todavía existen poblaciones rurales en las cuales no se han realizado estudios que documenten de manera sistemática el conocimiento biocultural de estas especies. En específico las comunidades de Orinda, municipio de Rosales y Buena Vista, municipio de Meoqui, ambas comunidades rurales de la región centro-sur del estado de Chihuahua, carecen de investigaciones que identifiquen y registren especies utilizadas, usos medicinales y la transmisión de estos saberes lo que limita su conservación y aprovechamiento.

Por lo tanto, presente estudio tiene como objetivo documentar el conocimiento etnobotánico sobre las plantas que se utilizan en las comunidades rurales del centro-sur del estado de Chihuahua.

Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo en las localidades de Orinda (28°15'33.45" N, 105°33'55.67" O; 1183 m s. n. m.) y Buena Vista (28°17'14.00" N, 105°34'13.00" O; 1193 m s. n. m.), en el municipio de Rosales, Chihuahua, México (Google Earth, 2026). La zona tiene una precipitación media anual aproximada de 400 mm y una temperatura media anual de entre 20 y 22 °C, caracterizándose por un clima templado y semifrío, muy seco. Predominan los suelos Phaeozem, característicos de zonas agrícolas donde la productividad depende en gran medida de los patrones de precipitación (INEGI, 2025).

La población objeto de estudio estuvo conformada por habitantes de las comunidades de Orinda, municipio de Rosales, y Buena Vista, municipio de Meoqui, Chihuahua. Teniendo como criterio de inclusión: personas de 18 años en adelante, residentes de las localidades de Orinda y Buena Vista.

Es estudio es de tipo mixto, de naturaleza aplicada, carácter descriptivo-correlacional, de diseño no experimental, transversal, empleando el método deductivo (Hernández-Sampieri & Mendoza-Torres, 2022). La técnica de recopilación de datos fue a través de un cuestionario estructurado y mediante el muestreo no probabilístico por bola de nieve (Creswell & Creswell, 2023), considerando la participación voluntaria de los respondentes.

La información fue recopilada a través de la aplicación de los cuestionarios estructurados de forma personal. Previamente a la captura de la información, se elaboró un libro de códigos en Excel en el que se asignó un valor numérico a cada variable y categoría de respuesta del cuestionario. Posteriormente, los datos fueron capturados en IBM SPSS Statistics versión 26, donde se realizó la depuración de la base de datos para verificar la consistencia de los registros antes del análisis estadístico.

Se realizó un análisis descriptivo mediante frecuencias absolutas y relativas para identificar las especies con mayor uso, parte de la planta utilizada, para que padecimiento se emplean, la manera en que se preparan, desde cuando se utiliza y desde hace cuánto tiempo. Asimismo, las preguntas relacionadas con la transmisión del conocimiento e interés de hacerlo.

Para el análisis biocultural y uso de las plantas medicinales se utilizaron cuatro indicadores etnobotánicos, ampliamente usados: Frecuencia Relativa de Citación (RFC) (Ecuación 1), Valor de Uso (UV) (Ecuación 2), Nivel de Fidelidad (FL) (Ecuación 3) y Factor de Consenso de Informantes (ICF) (Ecuación 4). Estos indicadores permiten estimar la relevancia cultural de cada especie, la diversidad de sus usos y el grado de acuerdo existente entre los informantes respecto a su utilización.

La Frecuencia Relativa de Citación (RFC) se calculó mediante la expresión:

$$RFC = \frac{FC}{N} \qquad (1)$$

donde FC corresponde al número de informantes que mencionaron una determinada especie y N al número total de informantes entrevistados. Este índice varía entre 0 y 1; valores cercanos a 1 indican que la especie es ampliamente conocida y utilizada dentro de la comunidad (Tardío & Pardo-de-Santayana, 2008).

El Valor de Uso (UV) se estimó mediante la ecuación:

$$UV = \frac{\sum U_i}{N} \qquad (2)$$

donde Ui representa el número de usos registrados para una especie y N el número total de informantes. Valores elevados de UV reflejan especies con mayor importancia cultural y una mayor diversidad de usos reportados (Phillips & Gentry, 1993).

El Nivel de Fidelidad (FL) se determinó utilizando la siguiente fórmula:

$$FL = \left(\frac{N_p}{N}\right) * 100 \qquad (3)$$

donde Np es el número de informantes que mencionaron una especie para tratar un padecimiento específico y N corresponde al número total de informantes que citaron dicha especie para cualquier uso medicinal. Este índice expresa el porcentaje de preferencia de una planta para el tratamiento de una enfermedad determinada; valores altos indican una elevada especificidad de uso (Friedman et al., 1986).

Y, el Factor de Consenso de Informantes (ICF) se calculó para cada categoría de padecimientos mediante la ecuación:

$$ICF = \frac{Nur - Nt}{Nur - 1} \qquad (4)$$

donde Nur representa el número total de reportes de uso dentro de una categoría de enfermedad y Nt el número de especies empleadas para tratar dicha categoría. Valores cercanos a 1 indican un alto grado de consenso entre los informantes, mientras que valores próximos a 0 reflejan un menor acuerdo en la selección de las especies medicinales. Este índice fue propuesto por Trotter y Logan (1986) y posteriormente adaptado para estudios de plantas medicinales por Heinrich et al. (1998).

Resultados y discusión

Se entrevistó a un total de 30 habitantes de las localidades de Orinda y Buena Vista, Chihuahua, quienes cumplieron con los criterios de inclusión establecidos en el estudio. La caracterización sociodemográfica de los participantes (cuadro 1) permitió identificar la distribución por género, edad, nivel educativo y ocupación. A continuación, se muestran las frecuencias de las edades de los respondentes, respecto a género, localidad y rango de edad.

Cuadro 1. Perfil sociodemográfico de los participantes

Variable	Categoría	n	%
Género	Mujeres	12	40.0
	Hombres	18	60.0
Localidad	Buena Vista	11	36.7
	Orinda	19	63.3
Rango de edad	18–30 años	2	6.7
	31–50 años	9	30.0
	51–70 años	14	46.7
	≥71 años	5	16.7

Fuente: elaboración propia.

La muestra estuvo integrada por 30 participantes, de los cuales 19 (63.3%) correspondieron a la localidad de Orinda y 11 (36.7%) a Buena Vista. En relación al género, participaron 18 hombres (60.0%) y 12 mujeres (40.0%).

En el cuadro 1, se observa que, en la distribución por edad, el grupo de 51 a 70 años obtuvo mayor proporción, con 14 participantes (46.7%), seguido por el grupo de 31 a 50 años, con 9 participantes (30.0%). El grupo de adultos de más de 71 años se conformó por 5 participantes (16.7%), mientras que el grupo de 18 a 30 años, fue representado solamente por 2 personas (6.7%). Los resultados señalan que la muestra estuvo conformada en su mayoría por personas adultas y adultos mayores, principalmente en la localidad de Orinda.

Los datos recabados también mostraron la principal ocupación de los participantes en el estudio y su escolaridad.

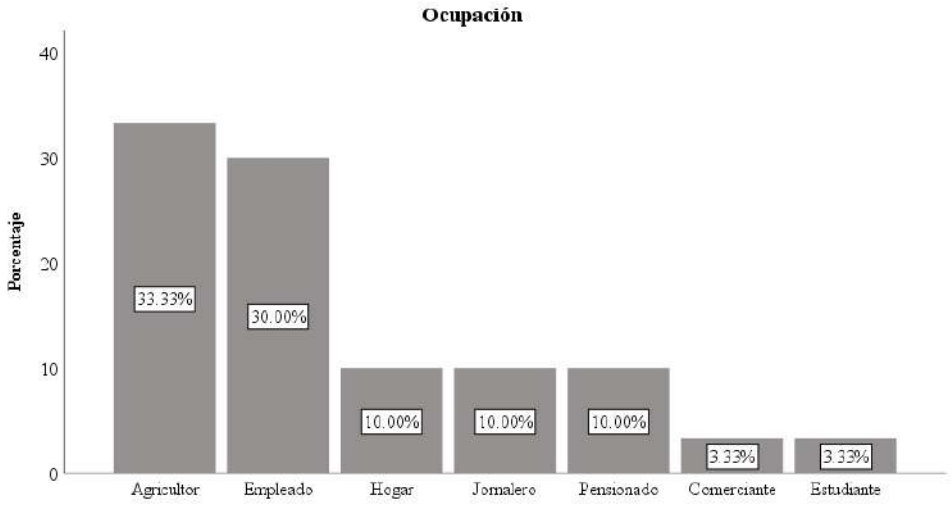


Figura 1. Ocupación principal de los participantes
Fuente: elaboración propia.

En la figura 1, se muestra que la ocupación con mayor frecuencia fue la de agricultor (33.3%), seguida por empleados (30%), mientras que las ocupaciones de hogar, jornalero y pensionado al sumarse consiguen un porcentaje del 30%.

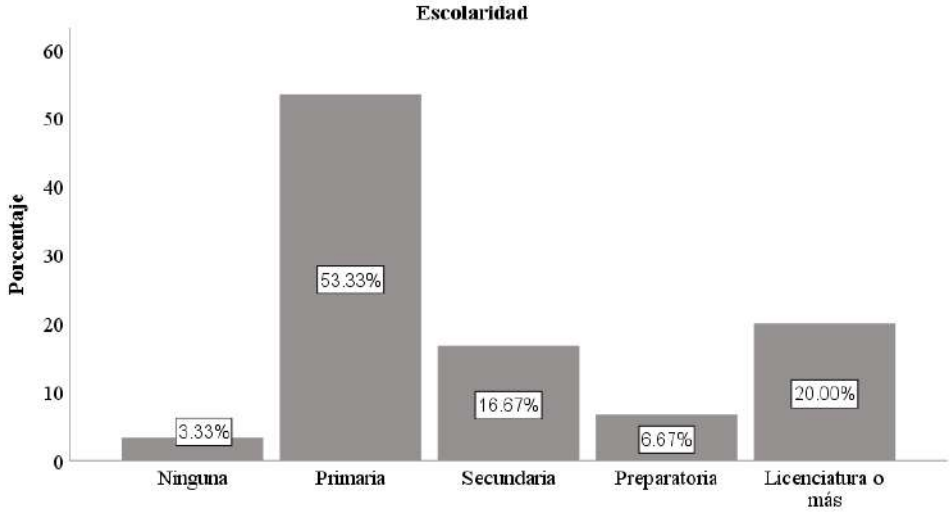


Figura 2. Escolaridad de los participantes
Fuente: elaboración propia.

En la figura 2, la escolaridad con mayor frecuencia fue la de primaria (53.3%), seguida de licenciatura o más (20.0%) y nivel secundaria (16.67%).

De los datos obtenidos por los participantes se recabaron los nombres comunes de las especies medicinales, los padecimientos tratados, partes de la planta utilizadas y formas de preparación (cuadro 3). A continuación, las especies mencionadas por los participantes fueron:

Cuadro 2. Especies medicinales, padecimientos, usos y preparación

Planta (nombre común)	Partes	Usos	Preparación
Mezquite	Corteza, Fruto, Hoja, Raíz, Tallo	Dolor de estómago, Empacho, Fiebre, Piedras en riñón	Cocimiento
Sangregrada	Raíz, Tallo	Crecimiento de cabello, Dolor de dientes, Sangrado de encía, Dientes flojos	Cocimiento, Masticada Rama dentro de champú
Nopal	Penca	Artritis, Bajar de peso, Colesterol, Diabetes, Irritación piel	Cocimiento, Jugo, Licuado, Baba
Ocotillo	Hoja, Raíz, Tallo	Dolor de dientes, Tos/flema, Salivar	Cocimiento, Masticada
Epazote	Hoja, Planta completa, Tallo	Conciliar sueño, Cólicos, Diarrea, Dolor de cabeza, Dolor de estómago, Gripe	Cocimiento
Cacolmeca	Raíz	Circulación, Colesterol, Sangre delgada	Cocimiento
Laurel	Hoja	Dolor de estómago, Dolor de oídos, Dolor muscular, Empacho, Tos/flema	Cocimiento
Ruda	Hoja, Planta completa	Conciliar sueño, Dolor de cabeza, Dolor de estómago, Dolor de oídos, Nervios	Cocimiento, Macerado en aceite, Hoja cruda
Peyote	Planta completa	Dolor de rodillas/huesos, Dolor muscular, Inflamación	Macerado en alcohol, Masticada, Pomada
Albahaca	Hoja	Dolor de cabeza, Dolor de estómago, Empacho, Fatiga	Cocimiento, Hoja cruda
Gordolobo	Flor, Hoja, Planta completa, Tallo	Dolor de estómago, Gripe, Irritación piel, Tos/flema	Cocimiento
Hierbanis	Flor, Hoja, Planta completa,	Conciliar sueño, Dolor de estómago, Gripe, Tos/flema	Cocimiento

	Tallo		
Hierba de la vibora	Hoja, Planta completa, Tallo	Diabetes, Dolor muscular, Fiebre, Gripe, Tos/flema	Cocimiento
Cola de caballo	Planta completa, Tallo	Cabello, Gripe, Piedras en riñón, Tos/flema	Cocimiento
Salvilla	Hoja	Diarrea	Cocimiento
Manzanilla	Flor, Planta completa	Ardor de ojos, Conciliar sueño, Cólicos, Dolor de estómago, Dolor muscular, Heridas, Irritación estómago	Cocimiento
Mejorana	Hoja	Dolor de cabeza, Dolor de estómago, Dolor de oídos	Cocimiento, Hoja cruda
Diente de león	Flor, Hoja	Circulación, Cáncer, Nervios, Piedras en riñón	Cocimiento
Clavo	Flor	Desparasitar, Dolor de dientes, Inflamación, Nervios	Cocimiento, Macerado en alcohol, Masticada
Romero	Hoja, Tallo	Cabello, Empacho, Nervios	Cocimiento, Rama dentro de champú
Cúrcuma	Otro, Planta completa, Raíz	Bajar de peso, Circulación, Diabetes, Dolor de estómago, Empacho, Fatiga	Cocimiento, Polvo
Jengibre	Fruto	Bajar de peso, Colesterol, Diabetes, Empacho, Fatiga, Inflamación	Cocimiento, Infusión, Rallado crudo
Canela	Corteza	Bajar de peso, Circulación, Empacho, Gripe, Tos/flema	Cocimiento, Masticada
Valeriana	Hoja	Conciliar sueño, Dolor de cabeza, Nervios	Cocimiento, Pastillas
Tomillo	Flor, Hoja	Congestión nasal, Dolor de estómago, Gripe, Tos/flema	Cocimiento, Pomada
Jamaica	Flor	Bajar de peso, Circulación, Colesterol, Hígado, Inflamación, Piedras en riñón, Dificultad para orinar	Cocimiento, Infusión
Moringa	Hoja, Otro, Semilla	Artritis, Diabetes, Dolor muscular, Empacho, Fatiga, Nervios	Cocimiento, Masticada, Se comen las semillas
Hierbabuena	Hoja	Dolor de cabeza, Dolor de estómago, Mal aliento, Tos/flema	Cocimiento, Otra
Árnica	Hoja, Planta completa	Dolor muscular, Heridas, Inflamación, Irritación piel	Cataplasma, Cocimiento, Pomada
Álamo	Corteza, Hoja	Dolor de dientes, Dolor muscular, Heridas, Inflamación	Cataplasma, Cocimiento
Barba de elote	Otro	Piedras en riñón, Dificultad para orinar, Ardor al orinar	Cocimiento
Pata de buey	Hoja, Planta completa, Raíz	Diabetes, Hemorroides	Cocimiento

Guamis	Hoja, Tallo	Bajar de peso, Diabetes, Dolor de estómago, Dolor de rodillas/huesos, Gripe, Olor de pies, Piedras en riñón	Cocimiento, Infusión, Otra
Higuera	Fruto, Hoja	Diabetes, Dolor de dientes, Gripe, Irritación piel, Granos	Cocimiento, Macerado en alcohol, Secreción blanca del fruto
Orégano	Hoja, Planta completa	Cáncer, Tos/flema	Cocimiento
Estafiate	Hoja, Tallo	Diarrea, Dolor de estómago, Empacho	Cocimiento
Sábila	Otro	Ardor de ojos, Proteger el cabello, Dolor muscular, Espinas enterradas, Heridas, Irritación estómago, Irritación piel, Tos/flema, Carnosidad en los ojos, Ver borroso	Cataplasma, Cocimiento, Licuado, Baba, Pomada, Penca quemada
Eucalipto	Hoja	Congestión nasal, Gripe, Pulmones, Tos/flema	Cocimiento, Gel
Nogal	Hoja	Colesterol, Sangre delgada	Cocimiento
Ortiguilla	Flor, Planta completa, Semilla	Artritis, Diabetes, Piedras en riñón	Cocimiento, Macerado en alcohol
Malva	Hoja	Empacho, Heridas, Tos/flema	Cataplasma, Cocimiento
Rosa de castilla	Flor	Dolor de estómago, Empacho, Irritación piel	Cocimiento
Bugambilia	Flor, Hoja	Dolor de estómago, Irritación piel, Pulmones, Tos/flema	Cocimiento, Jarabe
Maguey	Penca	Artritis, Diabetes, Espinas enterradas, Sangre delgada	Penca quemada, Baba, Cocimiento
Ajo	Fruto	Desparasitar, Gripe, Pulmones, Tos/flema	Fruto crudo
Hierba de la peña	Planta completa	Piedras en riñón	Cocimiento
Siempreviva	Hoja	Dolor de dientes	Colocar hoja en diente con dolor
Hierba del indio	Planta completa	Irritación piel, Nervios, Tos/flema	Cataplasma, Cocimiento
Cadillo	Semilla	Diarrea	Cocimiento
Granada	Fruto, Otro	Diabetes, Empacho, Piedras en riñón	Cocimiento, Jugo
Trompillo	Raíz	Empacho	Cocimiento
Aceitilla	Planta completa	Piedras en riñón, dificultad para orinar, ardor al orinar	Cocimiento
Palo azul	Raíz	Piedras en riñón, dificultad para orinar	Cocimiento, Infusión
Asta de venado	Otro	Piedras en riñón	Cocimiento
Alpistle	Semilla	Bajar de peso	Crudo en agua

Agrío	Hoja, Semilla, Tallo	Diabetes	Cocimiento
Popotillo	Tallo	Diabetes, Piedras en riñón, Dificultad para orinar, ardor al orinar	Cocimiento
Lengua de suegra	Hoja	Piedras en riñón	Licuado
Sauco	Flor	Tos/flema	Cocimiento
Rosetilla morada	Planta completa	Piedras en riñón	Cocimiento
Cornetón	Corteza, Hoja	Dolor de rodillas/huesos, Espinas enterradas, Heridas	Cataplasma, Cocimiento, Lavar heridas
Hierba de sapo	Tallo	Gripe	Cocimiento
Zacate limón	Hoja	Dolor de estómago	Cocimiento
Tarais	Hoja	Piedras en riñón	Cocimiento
Poleo	Hoja	Conciliar sueño	Hoja cruda bajo almohada

Fuente: elaboración propia.

Una vez descritas las especies medicinales, sus usos y formas de preparación registradas durante las encuestas, se realizó el análisis cuantitativo de los indicadores etnobotánicos con el propósito de evaluar la importancia de cada una de las especies dentro del conocimiento comunitario, aquellas con mayor especificidad terapéutica y grado de consenso sobre su uso medicinal. Por lo cual, se calcularon la Frecuencia Relativa de Citación (RFC), el Valor de Uso (VU), el Nivel de Fidelidad (FL) y el Factor del Consenso de los Informantes (IFC).

En el siguiente cuadro (cuadro 3) se consideran las plantas medicinales con un RFC mayor o igual a 0.50, es decir citadas por al menos el 50 % de los participantes.

Cuadro 3. Frecuencia Relativa de Citación y Valor de Uso de las especies medicinales

Especie	RFC	VU
Laurel	0.967	1.333
Gordolobo	0.967	1.267
Hierbanís	0.900	1.100
Orégano	0.867	1.133
Sábila	0.800	1.433
Hierbabuena	0.800	0.967

Hierba de la víbora	0.767	1.167
Epazote	0.767	1.033
Mezquite	0.767	1.033
Nopal verdura	0.767	1.033
Guamis	0.767	0.900
Ruda	0.700	0.933
Árnica	0.700	0.933
Estafiate	0.700	0.833
Cola de caballo	0.700	0.733
Sangre de grado	0.667	0.733
Jamaica	0.633	0.967
Álamo	0.633	0.867
Eucalipto	0.600	0.733
Clavo	0.600	0.600
Moringa	0.567	0.667
Ajo	0.533	0.833
Canela	0.533	0.667
Manzanilla	0.500	0.767
Jengibre	0.500	0.733
Peyote	0.500	0.700
Pata de buey	0.500	0.600
Barba de elote	0.500	0.500

Nota: RFC = Frecuencia relativa de citación, VU= Valor de uso
Fuente: elaboración propia.

La Frecuencia Relativa de Citación mostró que el laurel y el gordolobo fueron las especies mayormente reconocidas entre los participantes (RFC= 0.967), seguidas por el hierbanís (0.900) y el orégano (0.867), lo que evidencia un conocimiento compartido por gran parte de la comunidad. Respecto al Valor de Uso, la sábila presentó el valor más alto (VU= 1.433), seguida por el laurel (1.333) y gordolobo (1.267), mostrando una mayor diversidad de aplicaciones terapéuticas atribuidas a las especies.

Como parte del análisis, también se determinó el Nivel de Fidelidad (NF) con el propósito de identificar las plantas medicinales con mayor consenso entre los participantes en relación con una especie. En el cuadro 4, se presentan las especies con los mayores valores de NF

registradas en las comunidades rurales de Orinda y Buena Vista, considerando únicamente a las que tengan un NF mayor o igual al 80%.

Cuadro 4. Plantas medicinales con mayor Nivel de Fidelidad

Especie	Principal uso medicinal	FL (%)
Sangre de grado	Dolor de dientes y encías	100.0
Barba de elote	Piedras en los riñones	100.0
Agrío	Diabetes	100.0
Asta de venado	Piedras en los riñones	100.0
Palo azul	Piedras en los riñones	100.0
Salvilla	Diarrea	100.0
Orégano	Tos y flemas	96.2
Rosa de Castilla	Ardor e irritación en la piel	90.9
Ajo	Gripe	87.5
Epazote	Dolor de estómago	87.0
Mezquite	Inflamación de estómago/empacho	87.0
Cola de caballo	Piedras en los riñones	85.7
Clavo	Dolor de dientes y encías	83.3
Cacolmeca	Sangre delgada	83.3
Popotillo	Piedras en los riñones	83.3
Bugambilia	Tos y flemas	81.8
Árnica	Heridas externas/cicatrizante	81.0
Pata de buey	Hemorroides	80.0

Nota: FL= Nivel de fidelidad
Fuente: elaboración propia.

En el cuadro 4, se muestra que las especies con mayor nivel de fidelidad fueron sangregrada, barba de elote, agrío, asta de venado, palo azul y salvilla obteniendo un FL del 100%. Asimismo, el orégano (96.2%), rosa de castilla (90.9%), ajo (87.5%), epazote y mezquite (87%), mostraron valores elevados.

De manera complementaria al análisis anterior, se determinó el Factor de Consenso de Informantes (ICF), con el propósito de evaluar el grado de acuerdo entre los participantes en relación con las categorías de padecimiento mencionadas. En el cuadro 5, se muestran las

categorías de padecimiento que obtuvieron los valores más altos de consenso entre los informantes.

Cuadro 5. Factor de consenso de informantes (ICF) por categorías de padecimiento

Padecimiento	Reportes de uso (Nur)	Número de especies (Nt)	ICF
Olor de pies/zapatos	10	1	1.000
Mal aliento	9	1	1.000
Hígado	5	1	1.000
Hemorroides/almorrana	12	1	1.000
Infertilidad	3	1	1.000

Nota: IFC = Factor de consenso de informantes
Fuente: elaboración propia.

Las categorías de padecimiento presentadas obtuvieron un ICF de 1.000, lo que indica que presentaron un consenso absoluto entre los informantes, al mostrar que cada una de las categorías se asoció únicamente a una planta medicinal. Los padecimientos fueron: hemorroides/almorranas (Nur= 12), seguido de olor de pies/zapatos (10) y mal aliento (9). Para que el conocimiento etnobotánico sea comunicado se requiere de agentes que lo transmitan. Como parte de este estudio se investigó sobre quienes han sido los que han transmitido el conocimiento a los participantes encuestados, los resultados fueron los siguientes:

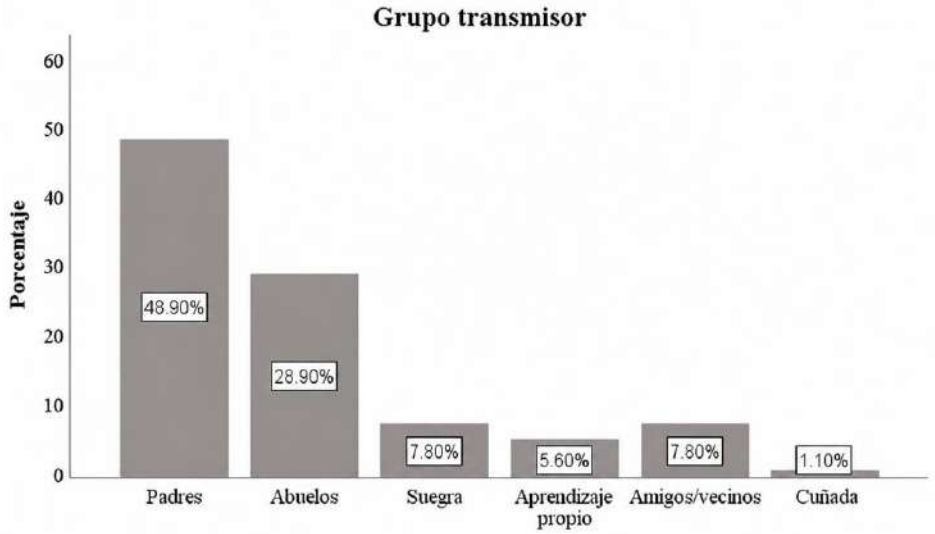


Figura 3. Agentes de transmisión de conocimiento etnobotánico
Fuente: elaboración propia.

La transmisión de los conocimientos etnobotánicos (figura 3) en su mayoría se realizó por grupos familiares como los padres (48.9%) y abuelos (28.9%), estos valores se obtuvieron dado que cada uno de los participantes eligió a varios grupos como medio de transmisión del conocimiento. El porcentaje de referencias (77.8%), señala la importancia del núcleo familiar y los procesos de transmisión intergeneracional. Agentes como amigos, vecinos y otros familiares, mostraron una participación menor.

Por último, los respondentes contestaron la manera en que conseguían las plantas medicinales, de los datos recopilados se generó la siguiente figura (figura 4):

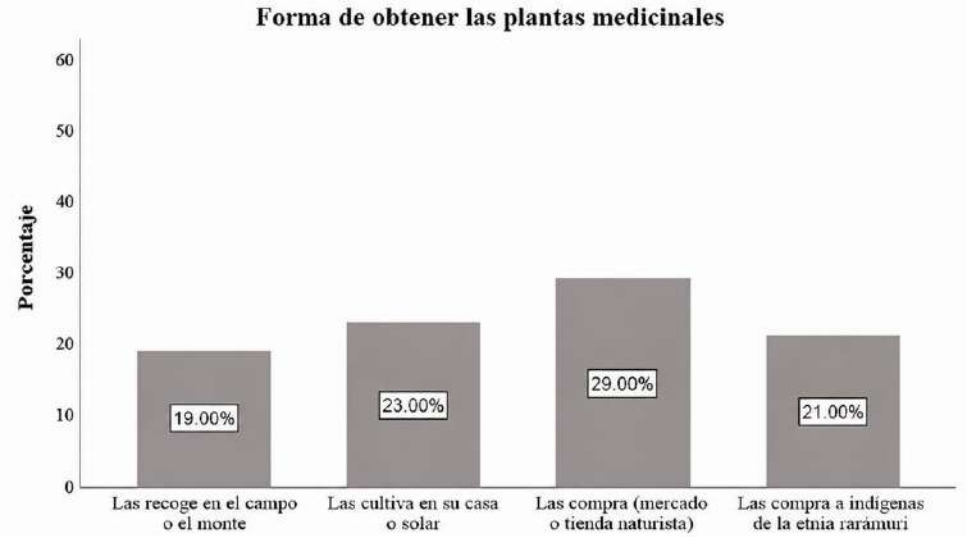


Figura 4. Forma de obtener las plantas medicinales
Fuente: elaboración propia.

En la figura 4, se muestra que la forma de obtener las plantas medicinales con mayor frecuencia fue la compra a través de mercados o tiendas naturistas (29.0%), le sigue la opción de cultivarlas en casa o solar (23.0%), seguida de comprárselas a la etnia rarámuri (21.0%) y recogerlas en el campo o monte (19.0%).

Conclusiones

El presente trabajo permitió documentar y sistematizar el conocimiento etnobotánico sobre plantas medicinales de dos comunidades rurales de la región centro sur del estado de Chihuahua, contribuyendo al registro del patrimonio biocultural, que hasta ahora no había sido documentado en Orinda y Buena Vista.

Los resultados señalan que los conocimientos etnobotánicos permanecen vigentes en las comunidades gracias al proceso de transmisión intergeneracional del conocimiento, permitiendo que continúen prácticas de atención primaria a la salud en comunidades alejadas de las ciudades.

Con la aplicación de los indicadores etnobotánicos, se logró identificar aquellas especies que poseen mayor relevancia terapéutica y grado de consenso entre los usuarios en relación con sus usos medicinales, mismas que pueden ser objeto de futuras investigaciones con enfoque farmacéutico, así como para diseñar estrategias en pro de la conservación del conocimiento medicinal tradicional asociado a las especies vegetales.

Literatura citada

Casanova-Pérez, C., Delgado-Caballero, C. E., Cruz-Bautista, P., & Casanova-Pérez, L. (2022). Plantas medicinales usadas por los Tének en la Huasteca, México. CienciaUAT, 16(2), 40–58. https://doi.org/10.29059/cienciauat.v16i2.1576

Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2023). Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches (6th ed.). SAGE Publications.

Cupido, M., De-Nova, J. A., & Cilia-López, V. G. (2024). Aproximaciones evolutivas en etnobotánica de plantas medicinales y bioprospección. Botanical Sciences, 102(1), 26–38. https://doi.org/10.17129/botsci.3325

Espinoza-Rimari, I., Rimari-Montalvo, U. E. y Espinoza-Rimari, L. N. (2021). Etnobotánica, desarrollo sostenible y educación de la conciencia ambiental en los pueblos del Matucana peruano. https://maestroysociedad.uo.edu.cu/index.php/MyS/article/view/5386/5029

Friedman, J., Yaniv, Z., Dafni, A., & Palewitch, D. (1986). A preliminary classification of the healing potential of medicinal plants, based on a rational analysis of an ethnopharmacological field survey among Bedouins in the Negev Desert, Israel. Journal of Ethnopharmacology, 16(2–3), 275–287.

Google Earth. (2026). Localización geográfica de Orinda, Rosales, Chihuahua, México: coordenadas 28°15'33.45"N, 105°33'55.67"O y elevación 1,183 msnm. Google LLC. https://earth.google.com/

Gutiérrez-García, L., Blanco-Salas, J., Sánchez-Martín, J., & Corbacho-Cuello, I. (2024). Etnobotánica: ciencia de proximidad para la educación científica en la enseñanza secundaria. Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales, (47), 149–166. https://doi.org/10.7203/dces.47.29492

Gutiérrez-Murillo, M. del M. (2022). Aportaciones de la etnobotánica y disciplinas afines a la documentación de la cestería en la España meridional. Arte, arqueología e historia, (27), 83–99. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9550827

Heinrich, M., Ankli, A., Frei, B., Weimann, C., & Sticher, O. (1998). Medicinal plants in Mexico: Healers' consensus and cultural importance. Social Science & Medicine, 47(11), 1859–1871. https://doi.org/10.1016/S0277-9536(98)00181-6

Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2022). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta (1.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2025). Espacio y Datos de México [Visor cartográfico]. https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx

Olivas Sánchez, M. P., Quiñónez Martínez, M., Enríquez Anchondo, I., Lavín Murcio, P. A., & Vital García, C. (2020). Flora nativa con uso medicinal del ecosistema desértico de Chihuahua. En G. E. Chávez Ortiz, A. Cano Aguilar, & E. P. Rojas González (Coords.), Sociedad, ambiente y cultura. Diversas miradas desde el Gran Desierto Chihuahuense (pp.68-82). Red Multidisciplinaria de Estudios del Desierto / Dospuntotres. http://cathi.uacj.mx/20.500.11961/18012

Phillips, O., & Gentry, A. H. (1993). The useful plants of Tambopata, Peru: I. Statistical hypotheses tests with a new quantitative technique. Economic Botany, 47(1), 15–32.

Sotelo-Leyva, C., Tagle-Emigdio, L. J., Aniceto-Teofilo, C., Galeana-Hernández, J., Condori-Cordero, S., Flores-Blanco, G., & Salinas-Sánchez, D. O. (2022). Estudio etnofarmacológico y fitoquímico de las plantas medicinales de mayor uso en Julián Blanco, Guerrero, México. Acta Agrícola y Pecuaria, 8(1). https://doi.org/10.30973/aap/2022.8.008173

Tardío, J., & Pardo-de-Santayana, M. (2008). Cultural Importance Indices: A Comparative Analysis Based on the Useful Wild Plants of Southern Cantabria (Northern Spain). Economic Botany, 62(1), 24–39.

Trotter, R. T., & Logan, M. H. (1986). Informant consensus: A new approach for identifying potentially effective medicinal plants. En N. L. Etkin (Ed.), Plants in Indigenous Medicine and Diet (pp. 91–112). Redgrave Publishing Company.

Vilaboa Arroniz, J., Platas Rosado, D. E., Zetina Córdoba, P., Gasperín García, E. M., Velázquez Muñoz, C. A., & Santiago Hernández, J. L. (2023). Conocimiento y uso de plantas medicinales en Calpan, Puebla, México: Percepción de varios sectores sociales. Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas, 22(5), 676–688. https://doi.org/10.37360/blacpma.23.22.5.49

Villanueva-Solis, I., Arreguín-Sánchez, M. L., Quiroz-García, D. L., & Fernández-Nava, R. (2020). Plantas medicinales que se comercializan en el mercado 8 de julio y uno tradicional,

ambos localizados en el Centro de Actopan, Hidalgo, México. Polibotánica, (50), 209–243. https://doi.org/10.18387/polibotanica.50.14

Cosmovisión de los tepetates en comunidades del estado de México y Tlaxcala

Miriam Galán Reséndiz[10], Rogelio Álvarez Hernández[11], Daniel Mendoza Tirzo[12], Jacqueline Galán Reséndiz

Resumen

En las comunidades del Eje Neovolcánico Transversal Mexicano, el uso del término tepetate deriva del vocablo nahua «tepetlatl» que históricamente sea confundido con «tepetlatlalli», como una generalización inexacta de estas palabras en el idioma español. Esta investigación propone conceptualizar y caracterizar al tepetate como un material parental, precursor de suelo/tierra, producto del proceso geológico volcánico. Se identificaron trece materiales, denominados localmente tepetates, mediante entrevistas libres, espontáneas y no remuneradas con personas en contacto directo con éste. Al jerarquizar, artificialmente, las nomenclaturas locales se observaron que el primer nivel correspondió el termino tepetate como material formador de suelo, seguido por las características de color, contenido de arenas, barro, fragmentos de roca y dureza, más un tercer nivel de diferenciación que se basó en las tonalidades de color. Del total de materiales, once presentaron alta dureza y difícil fragmentación; dos más, por su dureza temporal y fragmentación ante el humedeciendo, no correspondieron a tepetates, podrían pertenecer a suelos sepultados, situación que muestra una confusión en el uso popular del concepto. Para cada material se expusieron las variaciones específicas en las prácticas de formación de suelo que fueron aplicadas; de manera general, la roturación se práctica con maquinaria pesada para la construcción de terrazas de corte y rellano o manualmente con pico y pala para la construcción de sepas para la introducción de especies vegetales, el abonamiento se reportó variado, con residuos de cosecha o domésticos y con estiércol de ganado; estas áreas son destinadas para la agricultura o el pastoreo y otras son abandonadas o suelen ser utilizados para nuevos asentamientos humanos y la minería, por el costo que implica su manejo. Se sugiere eliminar el concepto de tepetate como tierra (o suelo).

Palabras clave. Tepetate, tepetlatl, material parental, tepetlatlalli, terrazas

[10] Área de Agronomía, Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, ralvarezh@chapingo.mx y dmendozat@chapingo.mx
[11] Área de Pedometría y Sensores Remotos, Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, mgalanr@chapingo.mx
[12] Universidad Nacional Autónoma de México, jacquelinegalanresendiz19@gmail.com

Abstract

In the communities of the Eje Neovolcánico Transversal Mexicano, the use of the term Tepetate derives from the Nahua word "tepetlatl" which has historically been confused with "tepetlatlalli", as an inaccurate generalization of these words in the Spanish language. This research proposes to conceptualize and characterize Tepetate as a parent material, soil/earth precursor, product of the volcanic geological process. Thirteen materials, locally called tepetates, identified through free, spontaneous and unpaid interviews with people in direct contact with it. By artificially hierarchizing the local nomenclatures, it was reduced that the first level corresponded to the term tepetate as a soil-forming material, followed by the characteristics of color, sand content, mud, rock fragments and hardness, plus a third level of differentiation that it is based on color tones. Of the total materials, eleven presented high hardness and difficult fragmentation; two more, due to their temporary hardness and fragmentation due to wetting, did not correspond to tepetates, they could belong to buried soils, a situation that shows a confusion in the popular use of the concept. For each material, the specific variations in the soil formation practices that were applied were exposed; In general, plowing is practiced with heavy machinery for the construction of cut-and-fill terraces or manually with a pick and shovel for the construction of stumps for the introduction of plant species. Fertilization reported to varied, with harvest or domestic residues. In addition, with cattle dung, these areas are destined for agriculture or grazing and others are abandoned or usually used for new human settlements and mining, due to the cost that their management implies. It suggested eliminating the concept of tepetate as land (or soil).

Keywords*:* Tepetate, tepetlatl, soil precursor, tepetlatlalli, terrace

Introducción

En México, en diferentes comunidades del Eje Neovolcánico Transversal, es común por parte de los productores agrícolas el uso del término *tepetate* derivado del vocablo nahua «*tepetlatl*» *(tetl*, piedra y *petatl* lecho o cama; Montemayor, 2010). Interpretado técnicamente como un material geológico, que resulta de erupciones volcánicas, violentas, donde el polvo, los piroclastos y el magma se asientan en la superficie, se acumulan, enfrían y litifican, por compactación o cementación (Correa, *et al*., 2019).

En el idioma nahua existen dos vocablos relacionados con el tepetate: «*tepetlatl*» y «*tepetlatlalli*». El primero corresponde a lo establecido en el párrafo anterior y el segundo, al producto generado al desmenuzar y abonar el *tepetlatl*, es decir, un suelo (o tierra) formado por el hombre (Gutiérrez *et al*., 2017), que históricamente en varias etnias se ha incorporado a la agricultura. Sin embargo, durante el proceso de culturización a la llegada de los invasores

españoles existió confusión en los conceptos, al no entenderse los diferentes significados, se prefirió la generalización y el término fue utilizado como equivalente de un suelo no agrícola (Ortiz, 1999).

Esto, provocó que al tepetate se le considere, erróneamente, como una dualidad taxonómica, es decir, como un material parental y a su vez como una clase de tierra (o suelo), cuando en realidad fue un problema de traducción (Ortiz y Gutiérrez, 1999). En el *Códice Florentino*, el tepetate pertenece a las tierras catalogadas por su calidad como ruin. Gibson (1996), menciona que ningún nombre nahua de las tierras de calidad se incorporó al idioma español y fue todo lo contrario con las de mala calidad (por ejemplo: tequexquite y tepetate), considerando que esto surgió como una política de desprestigio a lo autóctono.

Ortiz y Gutiérrez (2001), indican que cuando los otomíes se refieren a los tepetates, también utilizan dos términos, *xido* y *xidohai*; el primero, lo relacionan con el material volcánico, aflorado a la superficie que no tiene aptitud agrícola, mientras que, al segundo, lo vinculan con el material desmenuzado y abonado para producir cultivos. Resultando entonces, que *xido* y *xidohai*, son sinónimos de los vocablos *tepetlatl* y *tepetlatlalli*, respectivamente.

Con lo anterior, se puede entender que, para los productores agrícolas, sobre todo, aquellos que tienen una ascendencia étnica, es clara la existencia de dos términos, uno para el material geológico y el otro para el *procesado* con la finalidad de hacerlo agrícolamente productivo. Mientras que, para algunos técnicos y científicos de suelos, solo existe un término, que se utiliza en ambas situaciones y que han tratado, sin éxito, de compararlo con otros materiales o incluso definirlo.

Nimblos (1987), señalo que la génesis de los tepetates es muy complicada porque puede ser de dos tipos: pedogénetica y geogenética. En consecuencia, se ha conceptualizado al *tepetate*, inexactamente, como un suelo volcánico endurecido [Peña y Zebrowsky (1992a, b); Peña, *et al*., (1992); Zebrowsky, (1992)] o capas de suelo compactadas, pero no cementadas (fragipanes), o capas cementadas por SiO_2 (duripanes) y por otras sales (Gama-Castro, *et al*., 2007). Sin embargo y de acuerdo con Dokuchaev, 1886 (citado por Ortiz y Ortiz 1990), el suelo se define como un cuerpo natural independiente que evoluciona y que se ha transformado a partir de un material parental o geológico, por la influencia del clima, la topografía, la biota y el tiempo.

En contraste, los tepetates, como materiales piroclásticos del tipo toba se forman en erupciones volcánicas, por procesos de consolidación y litificación (Tarbuck y Lutgens, 2005). Al respecto Charles F. Shaw en 1928, indicó que el tepetate (*tepetlatl*) es una formación depositada y consolidada por el proceso geológico hasta tener una consistencia

semejante a la de roca, que se intemperiza para formar un suelo. De manera similar, Brambila (1940), definió al tepetate como un estrato de material geológico, una mezcla de tobas, que produce un suelo. Williams (1972), lo interpretó como un material sin la dureza de una roca, ni tan friable como un suelo, sino intermedio.

El objetivo de esta investigación es contribuir a la identificación y registro de las caracterizaciones locales de los tepetates (*tepetlatl*), en dos grupos culturales del Eje Volcánico Transversal Mexicano, los acolhuas y los tlaxcaltecas, con la finalidad de establecer la consistencia de sus conceptos. Se parte de la hipótesis que el conocimiento local, agrupa a los tepetates en términos simples y observables, relacionados con las prácticas de formación de suelo, de roturación y abonamiento.

En las comunidades del Eje Volcánico Transversal Mexicano, desde la época prehispánica, la mayoría de los hombres y mujeres que trabajan la tierra, reconocen las distintas clases y los materiales que las originan. Pueden diferenciar las altamente productivas de otras con propiedades limitadas (Williams & Ortiz, 1981), porque conservaron experiencias prácticas de un pueblo multicultural, formado por grupos de diferentes orígenes, chichimecas, huastecos, mixtecos, tlaxcaltecas y acolhuas (Tinajero, 2009).

El conocimiento local resulta ser muy útil, porque los términos utilizados permiten la designación de un mínimo de características comunes, como objeto de descripción y análisis (Ortiz & Torres, 1981), a diferentes niveles de generalización (Ortiz & Ortiz, 1990). En este sentido, los tepetates se han clasificado, generalmente, de acuerdo con su color y dureza. En México, Nimlos y Ortiz (1987) los diferenciaron por color como blanco (más duro), amarillo (menos duro) y rojo (de dureza intermedia) y la dureza fue considerada como la dificultad que representa penetrarlos con el azadón de palo o coa. También, se han reportado en Centroamérica con las denominaciones de talpetate y cangagua en Colombia, Ecuador, Perú y Chile, en este último también como moromoro, tosca o ñadis (Gama-Castro, *et al*., 2007).

Los aztecas tenían un conocimiento detallado sobre el *tepetatl*, los suelos formados a partir de él y lo representaron con glifos, desde la época prehispánica (Gutiérrez-Castorena, *et al*., 2007). Estos, desarrollaron una de las más complejas glíficas de Mesoamérica (León-Portilla, 2016), con caracteres ideográficos, pictográficos, morfosilábicos y fonéticos, por medio de imágenes codificadas para identificar cualquier palabra o proceso (Magni, 2014). En relación, se han conservado tres códices: el *Kingsborough*, que se localiza en el Museo Británico en Inglaterra; el *Vergara*, que está en la Biblioteca Nacional de París, Francia; y, el *Santa María Asunción* que lo custodia la Universidad Nacional Autónoma de México.

Los códices *Vergara* y *Santa María Asunción* están firmados por el juez Pedro Vázquez de Vergara contienen un registro catastral y un censo, elaborado en la época de contacto, a la llegada de los españoles (Ortiz y Gutiérrez, 2001). Williams (1984), en sus estudios sobre estos códices reportó la representación pictográfica del *tepetlatlalli* o la tierra de tepetate y al menos, quince variantes, cinco de tipo arcilloso y once de tipo arenoso/gravoso, representados por glifos (Williams, 1992).

Gutiérrez *et al*., 2017, mencionan que, en el *Códice Florentino* elaborado por Sahagún en 1563, existe una ilustración de cómo se pulverizaba al *tepetlatl* y lo relacionan con el glifo de clase de tierra *tepetlatlalli* del Códice Santa María Asunción, es decir, con la formación de suelos artificiales; en otras ilustraciones se detallan elementos naturales y culturales del paisaje, asociadas a la presencia de terrazas, que podrían ser referidos como procesos etnopedológicos (López, 2011). Ambos Códices constituyen evidencia de la formación de suelos (Williams y Pierce, 2014) y de terrazas, como una práctica ancestral, frecuente, entre los grupos étnicos mesoamericanos (Rojas, 1988).

Es posible inferir, independientemente de su origen, que los tepetates presentan un rango de características fáciles de identificar en campo. El analizar y eliminar la dualidad del concepto permite distinguir los materiales parentales y las clases de tierra (o suelo) que se forman de ellos, de manera natural y antrópica. Evidentemente, los tepetates no pueden ser definidos como suelos porque no poseen características resultantes de los factores y procesos de formación (por ejemplo, el desarrollo de estructuras pedogenéticas y color).

El estudio de los tepetates busca coadyuvar al entendimiento y transformación de la dinámica de la degradación del paisaje ecosistemas y agroecosistemas. Los estudios etnopedológicos, reconocen la existencia del conocimiento generado en el proceso de trabajo sobre la tierra de los hombres y las mujeres y su utilidad.

Materiales y método

La investigación se realizó en tres comunidades localizadas en el Eje Volcánico Transversal Mexicano. En San Pedro Chiautzingo en Tepetlaoxtoc, entre los paralelos 19º 34’ y 19º 35’ N y los meridianos 98º 45’ y 98° 48’ O; San Luis Huexotla en Texcoco, entre los 19º 27’ y 19º 28’ N y los 98º 51’ y 98° 52’ O, ambas al oriente de la Cuenca de México, y, Adolfo López Mateos en Hueyotlipán, estado de Tlaxcala, entre 19º 30’ y 19º 31’ N y los 98º 22’ y 98° 24’ O. En una diversidad de estructuras geológicas del proceso volcánico-tectónico, del final del periodo Paleozoico y durante el Mesozoico, derivado en paisajes de lomeríos (Gutiérrez *et al*., 2017).

Las comunidades de estudio forman parte de la Provincia Fisiográfica Eje Neovolcánico, Subprovincia Lagos y Volcanes de Anáhuac. Pertenecen a la región hidrográfica Río Pánuco, Cuenca Río Moctezuma. San Pedro Chiautzingo, Tepetlaoxtoc y San Luis Huexotla, Texcoco, a la Subcuenca Lago de Texcoco, con las corrientes intermitentes Rio Hondo y Rio Sila para la primera y Rio Chapingo y Rio San Bernardino, para la segunda [Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2010]. En ambas, el clima corresponde al tipo BS(c) (w) (k´) g, semiárido, con lluvias en verano, de acuerdo con la clasificación de Köppen, modificado por García (1973).

En Tepetlaoxtoc los suelos reportados son Leptosols, Antrosols, Fluvisols (Gutiérrez *et al*., 2017), así como Andosols, y Umbrisols (INEGI, 2010). Cultivados, principalmente, con agave pulquero, en metepantles, en hileras perpendiculares a la pendiente natural del terreno que van formando terrazas, sucesivas, en las que se cultiva maíz (*Zea mays* L.), haba (*Vicia faba* L.), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y calabaza (*Cucurbita* sp.), eventualmente, con trigo (*Triticum aestivum* L.) y cebada (*Hordeum vulgare* L.) (García, et. al., 2020).

En San Luis Huexotla, los suelos reportados corresponden a los Regosols, Antrosols y Fluvisols (INEGI 2014), para cultivos nativos como maíz, frijol, calabaza y haba (*Vicia faba* L.), desde la época prehispánica, a los que se agregaron el trigo, la cebada (*Hordeum vulgare* L.), el centeno [*Secale cereale* (L.) M. Bieb] y la avena (*Avena sativa* L.).

En lo que respecta a la comunidad Adolfo López Mateos, municipio de Hueyotlipán, estado de Tlaxcala, predomina el clima C(w1)(w)b(i'), templado subhúmedo con lluvias en verano, con presencia de heladas en invierno, con base en García (1973). Los suelos que se mencionan corresponden a los Regosols, Antrosols y Phaeozems, destinados a la agricultura y el pastoreo, principalmente cultivan, maíz asociado con frijol, calabaza y haba (*Vicia faba* L.), y los monocultivos de trigo y avena (Concha, 2014).

Caracterización local de tepetates (*tepetlatl*)

En cada comunidad, se obtuvo información local de los tepetates, considerados como materiales parentales aflorados en la superficie, a través de entrevistas. Dichas, entrevistas fueron libres, espontáneas y no remuneradas (Gelfius, 1980 y Williams y Ortiz, 1981). Reportándolas en términos simples y observables, con el vocabulario de personas que tenían un contacto directo con estos materiales, buscando conocer: ¿cuántos tipos de tepetates existen?, ¿cómo se diferencian? y ¿cuáles de ellos son utilizados para la formación de tierras/suelos? Así mismo, determinar la consistencia de su conocimiento y aplicar pruebas rápidas en campo como una forma de evaluación de sus opiniones. Además, se obtuvieron

los usos y el manejo de los tepetates, respecto a las prácticas utilizadas para la formación de suelos, las variantes, si existen, en la roturación y el abonamiento.

Resultados y discusión

Caracterización local de tepetates (*tepetlatl*)

Las nomenclaturas locales para tepetates, mostraron el uso de palabras, principalmente, relacionadas al color o la presencia de arena, fragmentos rocosos o barro, asociadas con la dureza (Nimlos y Ortiz, 1987). Mayoritariamente, constituidas por la fusión de palabras derivadas del náhuatl y adjetivos en español. Al jerarquizarlas, artificialmente, el primer nivel puede ser el concepto de *tepetate*, como material parental, es decir, precursor de suelo, seguido por la forma de vida que pertenece a las características monotípicas (Berlin, 1973), de color y contenido de arenas, barro, fragmentos de roca y dureza, más un tercer nivel genérico de diferenciación en las tonalidades de color (Figura 1).

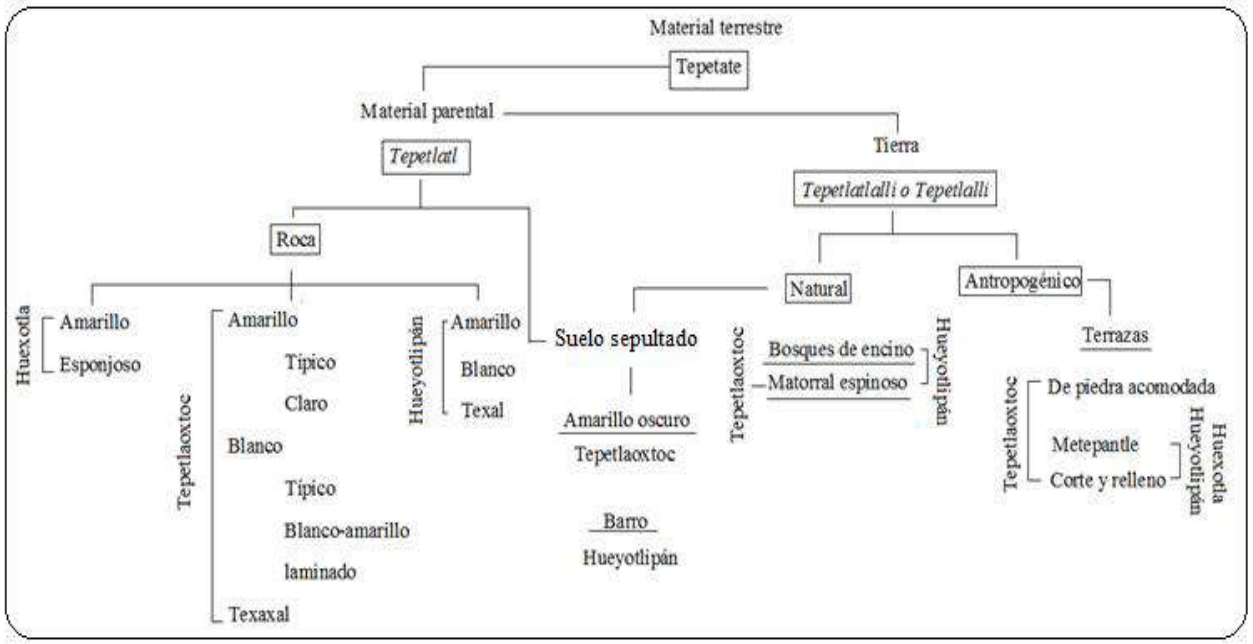


Figura 1. Diagrama para la identificación de tepetates en las comunidades de estudio.

En total se registraron trece materiales identificados localmente como tepetates: en San Luis Huexotla, se identificaron dos tipos de material, Amarillo y Esponjoso, este último terminó

es coherente al contenido de piedra pómez y al espacio poroso que este genera; en Tepetlaoxtoc fueron reportados siete, Amarillo, Amarillo obscuro, Amarillo claro, Blanco, Blanco-amarillo, Blanco laminado y Texaxal; y, en López Mateos cuatro, Amarillo, Blanco, Barro y Texal (Cuadro 1). De manera general, la mayor dureza la presentaron los tepetates blancos, en tanto los amarillos, el Esponjoso y el Barro, fueron de dureza intermedia y ligeramente duro el Texal. Tal como mencionan Nimlos y Ortiz (1987), los tepetates se identifican con color y alta dureza.

Cuadro 1. Nombres comunes y características de los tepetates.

Nombre común	Sitio	Color	Dureza	Peculiaridades	Usos
Amarillo	H1	Blanco amarillento	Moderada	Presenta hilos blancos	Material de construcción, formación de suelos agrícolas en terrazas
Esponjoso	H2	Café claro	Moderada	Contiene fragmentos de piedra pómez de diferentes tamaños	Zonas urbanas, material de construcción, formación de suelos agrícolas y pastoreo.
Amarillo	T1	Café	Moderada	Es común	Zonas urbanas, formación de suelos agrícolas en metepantles y áreas de reforestación
Amarillo obscuro	T2	Amarillo oscuro	Ligera	Está en bloques angulares, grandes y se rompe fácilmente al humedecerse	Material de construcción, antes para la formación de suelos agrícolas en metepantles
Amarillo claro	T3	Café claro	Ligera		Formación de suelos agrícolas en metepantles
Blanco	T4	Blanco	Duro	Contiene rellenos blancos	Material de construcción, formación de suelos agrícolas en metepantles
Blanco-amarillo	T5	Blanco y amarillo oscuro	Moderada	Contiene laminas, canales rellenos blancos	Formación de suelos agrícolas en metepantles
Blanco laminado	T6	Blanco	Duro	Esta dispuesto en capas	Formación de suelos agrícolas en metepantles
Texaxal	T7	Café rojizo	Duro	Contiene fragmentos de tezontle de diferentes tamaños	Material de construcción, extracción de rocas, pastoreo

Amarillo	L1	Café claro	Moderada	Es común	Pastoreo, anteriormente para la formación de suelos agrícolas, en terrazas, construcción de jagüey
Blanco	L2	Blanco	Duro	Contiene rellenos blancos	Pastoreo, antes para la formación de suelos agrícolas
Barro	L3	Café	Ligera	Tiene abundante barro, se rompe fácilmente al humedecerse	Formación de suelos agrícolas, en terrazas y pastoreo.
Texal	L4	Café rojizo	Ligera	Contiene fragmentos de roca de diferentes tamaños y tienen colores rojizos	Material de construcción, extracción de rocas, pastoreo.

Nota. H: San Luis Huexotla, Texcoco; T: San Pedro Chiautzingo, Tepetlaoxtoc; L: Adolfo López Mateos, Hueyotlipán.

La nomenclatura suele evocar un uso y manejo específicos para la formación de suelo en las tres comunidades, ocasionalmente, como material de construcción de importancia comercial (Rigñack-Delgado *et al*., 2021), la ubicación de zonas urbanas o simplemente son abandonadas por el alto costo que representa su manejo. Los materiales analizados estuvieron aflorados a la superficie, sin embrago, también pueden encontrarse bajo suelos agrícolas, urbanos y arqueológicos.

El conocimiento local sobre los tepetates al igual que el de suelo de diferentes etnias, tal como mencionan Ortiz y Gutiérrez (1999) constituye, en apariencia, una taxonomía formal, porque cuenta con una estructura jerárquica, impuesta, que tiene su propia nomenclatura y una relación entre ambas en el idioma español.

Solamente, en dos sitios se registraron, exclusivamente, vocablos nahuas, Texaxal en Tepetlaoxtoc y Texal en Hueyotlipán, compuestos por *tetl*-piedra y *xalli*-arena, al repetirse el termino xalli, se hace referencia a un contenido mayor de arena respecto al que solo se usa una vez. Tal como menciono (López, 2011) la expresión *petlatl* se combina con otro prefijo [*xalli* (arena) más *petlatl* se refiere a una capa o estrato con abundantes partículas gruesas como arena y grava] y adquiere un significado similar al de capa o estrato.

Los materiales identificados como Tepetate Amarillo oscuro de Tepetlaoxtoc y Tepetate de barro de Hueyotlipan, se fragmentan al humedecerse y poseen estructuras masivas que se rompen a estructuras, firmes, de tamaños menores, por lo que no pueden ser considerados como tepetates, ya que no poseen la alta dureza que las características. Podrían corresponder a suelos sepultado por algún evento geológico, que han vuelto a ser expuestos por procesos

degradativos. Es importante señalar que en estos sitios fue errónea la conceptualiza local de los tepetates como una clase de tierra.

Respecto al proceso de formación de suelos (Cuadro 2). En Huexotla, en ambos materiales la roturación implica romper la parte superior, con arado de cinceles o yunta (en el pasado), así como la construcción de terrazas tal como lo reportaron Rojas (1998), Nimlos y Hillery (1990). El abonamiento se realizó mediante la incorporación de residuos domésticos, de cosecha y estiércol. La aplicación de abonos orgánicos cambiado las propiedades físicas de los tepetates, promueven la formación de agregados (Baez *et al*., 2007), es decir, la formación de un nuevo suelo que implica un cambio drástico de estructura, generalmente, de masiva o laminar a bloques angulares, subangulares, granular e inclusive migajosa.

En Tepetlaoxtoc, se utilizan para la formación de suelos, principalmente, el metepantle, una práctica agrícola ancestral, que consiste en el cultivo de agave pulquero, en hileras en sentido perpendicular a la pendiente del terreno (García, et. al., 2020), que constituyen terrazas de formación sucesivas, cultivadas con maíz, frijol, haba y calabaza. La roturación fue con pico y pala en cepas y el abonamiento se realizó con estiércol de ganado de porte bajo y residuos domésticos. En algunos sitios se roturó con buldócer y arado de cinceles para ser incorporados a la agricultura de monocultivo de agave pulquero, avena y trigo.

Cuadro 2. Variantes en la roturación y abonamiento de los tepetates para la formación de suelos.

Nombre común	Sitio	Proceso para la formación de suelo
Amarillo	H1	Se elaboran terrazas con borde cubiertos con árboles y arbustos de usos múltiples. Se roturó con arado de cinceles y se abonó con estiércol y residuos domésticos, por periodos mayores a 15 años.
Esponjoso	H2	Se roturaron con buldócer y ocasionalmente con arado de cinceles. Se abonaron con residuos domésticos, por periodos mayores a 10 años.
Amarillo	T1	Se roturaron con buldócer para el cultivo de agave pulquero, nopal tunero, maíz, frijol, haba, calabaza, trigo y avena. El abonamiento se realiza con estiércol cada año.
Amarillo obscuro	T2	Se presenta en bloques, angulares, de diferentes dimensiones, con cuñas y cinceles, como material de construcción. Los pozos que quedan de esta actividad suelen usarse como jagüeyes o humedales.
Amarillo claro	T3	Se roturó, con pico y pala, para formar cepas, que fueron abonadas, unas sola vez, principalmente, con estiércol de ganado de porte bajo, para el cultivo de agave pulquero en hileras, y para formar terrazas sucesivas.

Blanco	T4	Se roturo, con buldócer y, ocasionalmente, con arado de cinceles, para el monocultivo de agave pulquero en monocultivo. Se abonó entre hileras con estiércol, cada año, durante los primeros de vida del agave.
Blanco-amarillo	T5	Se roturó, con buldócer, para el cultivo de agave pulquero en monocultivo. Se abonó con estiércol, cada año, durante los primeros 5 años de plantación.
Blanco laminado	T6	Se roturó, con pico y pala, para formar cepas que se abonaron, una sola vez, principalmente, con estiércol y residuos domésticos, para el cultivo de agave pulquero en hileras, que constituyeron, tras el paso del tiempo, terrazas. En ocasiones las cepas se elaboraron con retroexcavadora. Los cultivos entre hilera correspondieron a maíz, frijol, haba y calabaza y fueron abonados, previamente a la siembra, con composta y estiércol.
Texaxal	T7	No se manejó. Este material suele estar constituido por una gran cantidad de piedras de tezontle, redondas, que después de un proceso prolongado de erosión quedan expuestas en la superficie, dificultando la roturación y el paso del ganado.
Amarillo	L1	No se manejó. Se encuentra aflorado en la superficie, en las áreas comunales de monte, donde el uso es de todos y el manejo de nadie.
Blanco	L2	No se manejó. Este material suele ser muy duro y demanda una gran cantidad de mano de obra y el uso de maquinaria pesada. El gasto en el manejo es elevado.
Barro	L3	Se roturó con buldócer, para la formación de terrazas con bordes cubiertos de agave pulquero y árboles y arbustos de usos múltiples. Se abonan con estiércol de ganado de porte bajo, compostas y residuos de cosecha, todos los años, e incorporan con el tractor.
Texal	L4	Se extrajeron grandes cantidades del material para después ser triturado y cribado. Los pozos que quedaron de esta actividad se usan como jagüeyes.

Nota. H: San Luis Huexotla, Texcoco; T: San Pedro Chiautzingo, Tepetlaoxtoc; L: Adolfo López Mateos, Hueyotlipán.

La roturación y el manejo del tepetate conducen a una reducción de la densidad aparente gracias a la fabricación de fragmentos de tepetates que, fomentan la porosidad que después de varios años, pueden conducir a cambios importantes de su estructura (Prat y Rugama, 2003). También, reporto el uso como material de construcción y área de pastoreo.

En la comunidad Adolfo López Mateo los usos fueron para la formación de suelos agrícolas, como material de construcción y áreas de pastoreo. La roturación se describió con buldócer, solo en el Tepetate Barro, para la formación de terrazas con bordes cubiertos de agave pulquero y árboles y arbustos de usos múltiples. El Tepetate blanco se trabajó en el pasado reciente, sin embargo, se dejó de manejar por el alto costo que representa roturar este tipo de material por su alta dureza, aunque los suelos formados a partir de este se consideraron de mejor calidad. Se abonó con estiércol de ganado de porte bajo, compostas y residuos de cosecha. Fragmentar el tepetate, permite la aireación e incrementa el paso de agua, adicionar

materia orgánica fomenta las características estructurales (García-Cruz *et al*., 2007) y, por tanto, aumenta su calidad para el establecimiento de especies.

Conclusiones

Se identificaron 13 materiales localmente llamados tepetates, de cuales 11 poseen alta dureza y difícil fragmentación, los dos restantes no corresponden a tepetates, porque no mostraron alta dureza y se rompen fácilmente al humedecerse, estos podrían pertenecer a fracciones de suelos sepultados, situación que evidencia existe confusión en el uso popular del concepto.

Los términos utilizados, localmente, para nombrar a los tepetates, mayoritariamente, se constituyeron por la fusión de palabras en náhuatl y español, sólo en dos sitios se registraron, exclusivamente, vocablos nahuas, con relación con el contenido de arenas. Los criterios de diferenciación fueron el color y contenido de arenas, barro, fragmentos de roca y dureza, asimismo el uso y las variaciones en las prácticas de formación de suelo, roturación y abonado.

Se sugiere eliminar la dualidad del concepto tepetate, considerar al *tepetate* como formación depositada y consolidada por el proceso geológico volcánico, es decir, un material precursor de suelo. La formación de un nuevo suelo a partir del tepetate implica un cambio drástico de la estructura geológica a pedogenética, de manera natural por intemperismo o acelerada por el trabajo humano.

Literatura citada

Báez-Pérez, A., Etchevers-Barra, J. D., Prat, C., & Hidalgo-Moreno, C., 2007, Formación de agregados y secuestro de carbono en tepetates rehabilitados de la cuenca del Río Texcoco, México. Revista mexicana de ciencias geológicas, 24(3), 487-497.

Bautista, F., Maldonado, D. & Zinck, A., 2012, La clasificación Maya de los suelos. CONACYT. Ciencia y Desarrollo.

Berlin, B., Breedlove D. E. &. Raven, P. H.1973, General principles of classification and nomenclature in folk biology. Am. Antropologist 75: 214-242.

Bertaux, J. & P. Quantin., 1994, Relation géométrique et variations minéralogiques des différents termes d'une sécuence d' altération de tufs pyroclastiques de la région de Texcoco (Mexique). pp. 232-233. In: Transactions of the 15th International Congress of Soil Science. Vol. 5. Acapulco, Mexico.

Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., & Tursina, T., 1985, Handbook for soil thin section description. Waine Research.

Concha, D. C., 2014, Prácticas agroforestales y especies de uso múltiple para la rehabilitación y conservación de suelos volcánicos en Adolfo López Mateos, Tlaxcala: percepción de los agricultores. Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente, (26), 117-134.

Correa-Martínez, A.M., Rodríguez, G., Arango, M.I., & Zapata-García, G, 2019, Petrografía, geoquímica y geocronología U-Pb de las rocas volcánicas y piroclásticas de la Formación Noreán al NW del Macizo de Santander, Colombia. Boletín de Geología, 41(1), 29-54. DOI: 10.18273/revbol.v41n1-2019002.

De la Rosa, D., 2008, Evaluación Agro-ecológica de Suelos para un desarrollo rural sostenible. Madrid, España: Mundi-Prensa (Ed.).

Flach, K.W., W.D. Nettleton &O.A. Chadwick, 1992, the criteria of Duripans in the U.S. Soil Taxonomy and the contribution of micromorphology to characterize silica indurated soils. Terra Latinoamericana, 10: 34-45.

Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Báez, H., & Díaz-Ortega, J., 2007, Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 59(1), 133-145. https://dx.doi.org/10.18268/bsgm2007v59n1a11

García N., R. M., Galán R., M., Cuevas S., J. A. &Álvarez H., R, 2020, Identificación y caracterización morfológica de agaves en sistemas agroforestales con metepantle en tierras campesinas. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 11(4), 917-929.

García-Cruz, A., Flores-Roman, D., García-Calderón, NE, Ferrera-Cerrato, R., & Velázquez-Rodríguez, AS (2007). Habilitación de tepetate por efecto de mejoradores biológicos. Agrociencia, 41 (7), 723-731.

Gelfius, F., 1980, Herramientas para el Desarrollo Participativo; ed. B. Miranda. Octava reimpresión, 29.

Gibson, J., Ivancevich, J., & Donnelly, J, 1996, Las Organizaciones. Comportamiento, estructura y proceso. Colombia, McGraw Hill/Irwin.

Guerrero, E. G., Luna, J. L., & Caballero, E., 1992, Distribución de los tepetates de la República Mexicana escala 1: 4 000 000. Terra Latinoamericana, 10, 131-136.

Gutiérrez-Castorena, M., 1989, Estudio micromorfológico de los cementantes de algunos tepetates del Valle de México y Tlaxcala. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados en Ciencias Agrícolas. Montecillos, Texcoco, México.

Gutiérrez-Castorena, M., Ortiz-Solorio, C. A., Klaudia, O. L., & Cuanalo C. H., 1990, Micromorphologic analysis of some cements of calcareous soil from the Valley of Mexico and Tlaxcala. [Spanish]. Agrociencia.

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

Gutiérrez-Castorena, M. Carmen, Ortiz-Solorio, CA, & Sánchez-Guzmán, P., 2007, Formación de revestimientos arcillosos en tepetates de Texcoco, México. Catena, 71(3), 411-424.

Haulon, M., Werner, G., Flores-García, G., Vera-Reyes, A., & Felix-Henningsen, P., 2007, Evaluación de las tasas de erosión durante la rehabilitación de suelos volcánicos endurecidos (tepetates) en Tlaxcala. Revista mexicana de ciencias geológicas, 24(3), 498-509.

Hidalgo, C., J. D. Etchevers B., M. A. Pérez O., Vera A., D. Flores S., y H. Navarro G., 1999, Restauración de suelos volcánicos endurecidos. La experiencia del centro de México: Proyecto tepetates. In: Conservación y Restauración de Suelos PUMA-UNAM. Siebe, C, C. Rodarte, G. Toledo, J. Etchevers y K. Oleshko (eds). México pp: 452-472.

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

López C., A., 2011, Los glifos de suelo en códices acolhua de la Colonia temprana: un reanálisis de su significado. Desacatos, (37), 145-162.

Magni, C., 2014, El sistema de pensamiento olmeca, México: originalidad y especificidades. El código glífico y el lenguaje corporal. Cuicuilco, 21(60):

Navarro, G. H., 1998, Potencialidades agronómicas y sistemas rotacionales para la recuperación de suelos volcánicos endurecidos. Aptitud Productiva en Suelos Volcánicos Endurecidos (Tepetates). H Navarro, H Poupon, MA Pérez (eds). CP-ORSTOM. México.

Nimlos, T. J. & Zamora J. C., 1992, Indurad volcanic ash sool in Peru. Terra Latinoamericana, 10 (especial), 283-289.

Nimlos, T. J., & Ortiz-Solorio, C., 1987, Tepetate the rock mat. Journal of Soil and Water Conservation, 42(2), 83-86.

Nimlos, T. M., 1987, La nomenclatura de horizontes volcánicos endurecidos. Pp 10-18. In J.F. Ruiz F. (ed). Uso y manejo de los tepetates para el desarrollo rural. UACh, Depto. Suelos. México.

Nimlos, T. J., 1990, Morphology, genesis and classification of soils formed over Mexican tepetate. Soil Survey Horizons 30(3): 72-77

Nimlos, TJ y Hillery, PA., 1990, Las relaciones resistencia/humedad y conductividad hidráulica del tepetate mexicano. Ciencia del suelo, 150 (1), 425-430.

Ortiz S, C. A., 1999, Los levantamientos etnoedafológicos. (Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Estado de México).

Ortiz S. C. & Gutiérrez-Castorena, Ma. C. 2000. Situación actual y perspectivas de la clasificación de suelos en México.

Ortiz S., C. A & Cuanalo C., E., 1981, Introducción a los levantamientos de suelos. México. Colegio de Postgraduados.

Ortiz, S. C. A. & Gutiérrez, C. M. C., 2001, La etnoedafología en México una visión retrospectiva. Etnobiología 1: 44-62.

Ortiz, S. C. A. & Ortiz, V. B., 1990, Edafología. Departamento de suelos. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, Estado de México.

Ortiz, S. C. A. & Torres, G. J., 1981, Clasificación Francesa de Suelos. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Estado de México.

Ortiz, S. C. A., 2010, Edafología. Chapingo, Estado de México. 8ª Edición. Universidad Autónoma Chapingo.

Peña H. D., & Zebrowsky C., 1992a, Caracterización física y mineralógica de los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Terra Latinoamericana, 10 (especial), 156-163.

Peña H. D., & Zebrowsky C., 1992b, Los tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Terra Latinoamericana, 10 (especial), 151-155

Peña H. D., Mirnada M., M. E, Zebrowsky C. & Arias R., H. M., 1992, Resistencia de tepetates de la vertiente occidental de la Sierra Nevada. Terra Latinoamericana, 10 (especial), 164-170.

Peña H., D. & C. Zebrowsky., 1992, Estudio de los suelos volcánicos endurecidos (Tepetates) de las cuencas de México y Tlaxcala (México). Informe del Mapa Morfopedológico de la Vertiente Occidental de la Sierra Nevada. Colegio de Postgraduados-ORSTOM. Montecillo, Texcoco, México.

Prat, C., Ch, V. O., & Rugama, J. A., 2003, Impacto de la roturación y del manejo agronómico de un tepetate sobre su estructura. Terra Latinoamericana, 21(1), 109-115.

Ramírez-Builes, V. H., 2009. Las arcillas alófanas y su relación con las propiedades físicas y químicas del suelo. Invest unisarc. 7(1): 30-38.

Rigñack-Delgado, A., Orozco-Melgar, G., Crespo-Sariol, H., Mariño-Peacok, T., & Reyes-Dalmau, A., 2021, Caracterización de la porosidad de tobas vítreas y zeolitizadas de la región oriental de Cuba mediante el análisis de emisión acústica. Minería y Geología, 37(2), 146-161.

Rodríguez T., S., 1999, Procesos de intemperismo en tepetates y su influencia en la formación de suelos. Tesis de Maestría en Ciencias. Especialista en Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Rodríguez-Tapia, S., Ortiz-Solorio, C. A., Hidalgo-Moreno, C., & del Carmen Gutiérrez-Castorena, M., 2004, Los tepetates de la ladera oeste del cerro Tláloc: saprolita, sin endurecimiento pedológico. Terra Latinoamericana, 22(1), 11-21.

Rojas, T., 1988, Las siembras de ayer: la agricultura indígena del siglo XVI, Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, México.

Ruiz, O. V., 2010, Agaves productores de bebidas alcohólicas en México. (Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo. Estado de México. México).

Sahagún, Bernardino de, 1963, Florentine Codex: General history of the things of the New Spain. The School of American Research. University of Utah Press. Salt Lake City, UT, USA.

Salazar, L., 1938, Elementos de geología. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Sarabia, GE, Rebolledo, ES, Sedov, S., & Castro, JG, 2002, Tepetates del glacis de Buenavista, Morelos: interacción de procesos geomorfológicos y pedogenéticos. Investigaciones Geográficas (Mx), (48), 76-89.Acevedo S., O. A., L. E Ortiz H., D. Flores R., A. S. Velázquez R., y K. Flores C. 2003. Caracterización física y química de horizontes endurecidos (Tepetates) en suelos de origen volcánico del estado de México. Agrociencia 37: 435-449.

Sedov, S., Solleiro-Rebolledo, E., Terhorst, B., Solé, J., Flores-Delgadillo, MDL, Werner, G., & Poetsch, T., 2009, La secuencia de paleosuelos de la cuenca de Tlaxcala: un proxy multiescala del cambio ambiental del Cuaternario medio a tardío en el centro de México. Revista mexicana de ciencias geológicas, 26 (2), 448-465.

Soil Survey Staff, 2014, Keys to soil taxonomy. Twelfth edition. USDA. Soil Conservation Service. U.S. Government Printing Office. Washington, D.C

Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., Gama-Castro, J., Román, DF, & Escamilla-Sarabia, G., 2003, Secuencias paleosol-sedimentarias del Glacis de Buenavista, centro de México: interacción de la pedogénesis del Cuaternario Superior y la sedimentación volcánica. Cuaternario Internacional, 106, 185-201.

Stoops, G., 2003, Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections. Soil Science Society of America Inc.

Tapia, S. R., del Carmen Gutiérrez, M., Hidalgo, C., & Ortiz, C. A., 1999, Intemperismo en Tepetates y en cenizas volcánicas y su influencia en la formación de Andisoles. Terra, 17(2).

Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K., 2005, Ciencias de la Tierra. 8ª edi. Universitario, 686 pp.

Thury M., 1992, Pedogenic silicifications: sructures, micromorphology, mineralogy and their interpretation. Terra Latinoamericana, 10, 46-59.

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

Valdéz Marín, L.A., 1970, Características morfológicas y mineralógicas de los suelos de tepetate de la Cuenca de México. Tesis de Maestría en Ciencias. Especialista en Suelos. Escuela Nacional de Agricultura. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.

Van Reeuwijk, L. P., 1986, Procedures for soil analysis. Tech. Pap., vol.9. ISRIC. Wageningen, Netherlands

Williams B. J., 1992, Tepetate in Sixteen Century and contemporary folk terminology Valley of Mexico. Terra 10: 483-493.

Williams, B. J. & K. J. Pierce, 2014, Evidence of Acolhua science and pictorial land records. pp. 147-164. In: J. Lee and G. Brokaw (Eds.). Texcoco: Prehispanic and colonial perspectives. University Press of Colorado. Boulder, CO, USA.

Williams, B. J. & Ortiz, S. C. A., 1981, Middle American folk soil taxonomy. Annal Association of American Geographers 71 (3), 335-358.

Williams, B. J., 1972, Tepetate in the Valley of Mexico. Ann. Assoc. Am. Geog. 62: 618-626.

Williams, B. J., 1984, Mexican Pictorical Cadastral Registers. In Explorations in Ethnohistory: Indians of Central Mexico in the Sixteenth Century. Edited by H. R. Harvy and H. J. Prem. pp: 103 – 125. University of New Mexico Press. Alburquerque.

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

Zebrowsky C., 1992, Suelos volcánicos endurecidos los suelos volcánicos endurecidos en América Latina. Terra Latinoamericana, 10. 15-23.

Efecto del baño ultrasónico en el contenido de alcaloides totales del extracto de *Argemone ochroleuca*

Fátima Flores Zavala[13], Jesús Hernández Ruiz[14], Rocío Alejandra Imperial Cervantes[15]

Resumen

La agricultura requiere alternativas sustentables para disminuir la dependencia de fungicidas sintéticos y fortalecer el desarrollo de bioinsumos con menor impacto ambiental. En este contexto, *Argemone ochroleuca* Sweet representa una fuente vegetal de interés por su contenido de alcaloides con actividad biológica. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto del baño ultrasónico sobre la extracción de alcaloides totales en extractos acuosos de *A. ochroleuca*, mediante diferentes tiempos de sonicación y cuantificación espectrofotométrica con reactivo de Dragendorff. Se evaluaron cinco tratamientos: extracción convencional sin ultrasonido y ultrasonido durante 5, 10, 15 y 30 min a 120 W. La cuantificación se realizó a 435 nm utilizando (+)-cinchonina como estándar. Los resultados mostraron que el tratamiento de 5 min registró la mayor concentración promedio de alcaloides totales (151.21 µg/mL), seguido de 10 min (140.03 µg/mL), 15 min (118.30 µg/mL), el control (111.17 µg/mL) y 30 min (55.84 µg/mL). El ANOVA evidenció diferencias significativas entre tratamientos ($F = 16.43$; $p = 0.0002$), mientras que Tukey-Kramer agrupó a T0, T1, T2 y T3 en el mismo grupo estadístico y separó a T4 como tratamiento con menor concentración. Se concluye que el baño ultrasónico puede favorecer la extracción solo bajo tiempos cortos o moderados, pero la exposición prolongada reduce significativamente la recuperación de alcaloides, por lo que se requiere optimizar tiempo, temperatura, potencia y solvente antes de escalar el proceso.

Palabras clave: papaveracea, alcaloides totales, bioinsumos, Dragendorff, ultrasonido.

Abstract

[13] Universidad de Guanajuato, División de Ciencias de la Vida, Licenciatura en Agronegocios. Ex Hacienda El Copal, Km. 9 Carretera Irapuato-Silao A.P. 311, C.P. 36500, Irapuato, Guanajuato, México. Correo: f.floreszavala@ugto.mx

[14] Universidad de Guanajuato, División de Ciencias de la Vida, Bioextractos Lab. Ex Hacienda El Copal, Km. 9 Carretera Irapuato-Silao A.P. 311, C.P. 36500, Irapuato, Guanajuato, México * Correo autor responsable: hernandez.jesus@ugto.mx

[15] Universidad de Guanajuato, División de Ciencias de la Vida, Doctorado en Biociencias. Ex Hacienda El Copal, Km. 9 Carretera Irapuato-Silao A.P. 311, C.P. 36500, Irapuato, Guanajuato, México. Correo: ra.imperialcervantes@ugto.mx, f.floreszavala@ugto.mx, ra.imperialcervantes@ugto.mx

Agriculture requires sustainable alternatives to reduce dependence on synthetic fungicides and support the development of bioinputs with lower environmental impact. In this context, *Argemone ochroleuca* Sweet is a plant source of interest due to its alkaloid content and biological potential. The objective of this study was to evaluate the effect of ultrasonic bath treatment on total alkaloid extraction from aqueous extracts of *A. ochroleuca* using different sonication times and spectrophotometric quantification with Dragendorff reagent. Five treatments were evaluated: conventional extraction without ultrasound and ultrasound exposure for 5, 10, 15, and 30 min at 120 W. Quantification was performed at 435 nm using (+)-cinchonine as standard. The results
showed that the 5 min treatment had the highest average concentration of total alkaloids (151.21 µg/mL), followed by 10 min (140.03 µg/mL), 15 min (118.30 µg/mL), control extraction (111.17 µg/mL), and 30 min (55.84 µg/mL). ANOVA revealed significant differences among treatments ($F = 16.43$; $p = 0.0002$), while Tukey-Kramer grouped T0, T1, T2, and T3 together and separated T4 as the treatment with the lowest concentration. It is concluded that ultrasonic bath extraction may improve alkaloid recovery only under short or moderate exposure times, whereas prolonged sonication significantly reduces total alkaloid recovery; therefore, time, temperature, power, and solvent conditions should be optimized before process scale-up.

Keywords: papaveracea, bioinputs, Dragendorff, total alkaloids, ultrasound.

Introducción

La producción agrícola contemporánea enfrenta presiones por reducir el impacto ambiental y sanitario del uso intensivo de plaguicidas y fungicidas sintéticos, asociados con contaminación de suelo y agua, riesgos toxicológicos y desequilibrios en los agroecosistemas; por ello, se impulsan estrategias fitosanitarias sustentables basadas en compuestos naturales de origen vegetal (Del Puerto Rodríguez et al., 2014; Pérez et al., 2014). En este contexto, los extractos vegetales constituyen una alternativa para bioinsumos, ya que contienen metabolitos secundarios alcaloides, fenoles, flavonoides y terpenoides con actividad biológica aprovechable en formulaciones biorracionales, siempre que se controle la composición química, el método de extracción y la estabilidad del extracto (Badaracco et al., 2020; Mesa et al., 2019; Zaker, 2016).

Argemone ochroleuca Sweet, perteneciente a la familia Papaveraceae, ha sido documentada como una especie con relevancia fitoquímica por la presencia de alcaloides isoquinolínicos y benzilisoquinolínicos, entre ellos sanguinarina, berberina y protopina. Estos compuestos se han asociado con actividades antimicrobianas, antifúngicas y biocidas, por lo que la especie

representa una fuente potencial para explorar alternativas vegetales de uso agrícola (Hernández Martínez et al., 2020; Hernández-Ruiz et al., 2020; Juárez-García et al., 2020).

El aprovechamiento técnico de *A. ochroleuca* no depende únicamente de la presencia de alcaloides, sino también de la eficiencia y reproducibilidad del proceso de extracción. Los métodos convencionales, como maceración o reflujo, suelen requerir tiempos prolongados y pueden presentar variabilidad en la recuperación de metabolitos; por ello, las tecnologías emergentes de extracción han adquirido relevancia en la obtención de compuestos bioactivos con mayor eficiencia y menor consumo de tiempo o solvente (Abubakar & Haque, 2020; Sun et al., 2025).

La extracción asistida por ultrasonido se fundamenta en el fenómeno de cavitación acústica, mediante el cual se generan microburbujas que colapsan y producen fuerzas mecánicas capaces de alterar la estructura del tejido vegetal, favoreciendo la transferencia de masa y la liberación de metabolitos al solvente. No obstante, su eficacia depende de variables como tiempo, potencia, solvente y temperatura; además, exposiciones prolongadas pueden deteriorar compuestos sensibles (Panda & Manickam, 2019; Fajardo-Contreras et al., 2022; Aung & Das, 2025).
En este sentido, evaluar el baño ultrasónico como herramienta para extraer alcaloides totales de *A. ochroleuca* resulta pertinente para el sector agroalimentario, ya que puede aportar criterios técnicos para optimizar procesos de obtención de extractos vegetales con potencial bioactivo. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del tiempo de sonicación sobre la concentración de alcaloides totales en extractos acuosos de *A. ochroleuca*, con la finalidad de identificar condiciones preliminares útiles para el desarrollo posterior de bioinsumos agrícolas (Sreevidya & Mehrotra, 2003; Zavaleta Juárez et al., 2024).

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló en el laboratorio de Bioextractos Vegetales de la División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. El material vegetal de A. ochroleuca fue recolectado, lavado y desinfectado con hipoclorito de sodio; posteriormente se secó hasta peso constante, se trituró y se almacenó en bolsas herméticas protegidas de la luz y la humedad.
Para cada tratamiento se utilizaron 0.50 g de muestra seca y pulverizada, a los cuales se adicionaron 20 mL del solvente de extracción. Se evaluaron cinco condiciones: T0, extracción convencional sin ultrasonido; T1, ultrasonido durante 5 min a 120 W; T2, ultrasonido durante 10 min a 120 W; T3, ultrasonido durante 15 min a 120 W; y T4, ultrasonido durante 30 min a 120 W (Cuadro 1).

Cuadro 1. Tratamientos de extracción evaluados en A. ochroleuca

Tratamiento	Condición de extracción	Propósito experimental
T0	Sin ultrasonido	Tratamiento control
T1	Ultrasonido 5 min, 120 W	Evaluar efecto inicial
T2	Ultrasonido 10 min, 120 W	Evaluar tiempo intermedio
T3	Ultrasonido 15 min, 120 W	Explorar posible meseta
T4	Ultrasonido 30 min, 120 W	Evaluar sobreexposición

Fuente: Elaboración propia.

Una vez concluida la extracción, los extractos se filtraron para retirar residuos sólidos y se acidificaron hasta un pH aproximado de 2.5 con ácido tartárico al 5 %. Esta condición se aplicó con el propósito de mantener los alcaloides en forma protonada y favorecer su reacción con el reactivo de Dragendorff durante la cuantificación.

La determinación de alcaloides totales se realizó mediante el método colorimétrico con reactivo de Dragendorff. Para el análisis, 0.5 mL de extracto se mezclaron con 0.5 mL del reactivo; posteriormente, la mezcla se homogeneizó y se leyó en espectrofotómetro UV-Vis a 435 nm, utilizando celdas de plástico de 1 cm de paso óptico.
La curva de calibración se preparó con (+)-cinchonina como estándar de referencia. Se elaboraron soluciones de 0, 4, 6, 8 y 10 µg/mL y cada concentración fue analizada por triplicado. La concentración de alcaloides totales en los extractos se calculó a partir de la ecuación de la curva y se expresó como concentración estimada de alcaloides totales.
Los datos se analizaron mediante ANOVA de una vía, considerando como factor el tratamiento de extracción y como variable de respuesta la concentración de alcaloides totales. Cuando se detectaron diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey-Kramer, con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Resultados y discusión

La curva de calibración construida con (+)-cinchonina mostró una respuesta lineal entre la concentración del estándar y la absorbancia, expresada mediante la ecuación Absorbancia = 0.018483 (concentración) − 0.0453. Esta permitió transformar las lecturas espectrofotométricas en concentraciones estimadas de alcaloides totales y comparar de manera consistente los tratamientos de extracción evaluados. Por tanto, el método empleado constituyó una herramienta analítica pertinente para determinar el efecto del baño ultrasónico sobre la recuperación de alcaloides en extractos de *A. ochroleuca* (Sreevidya & Mehrotra, 2003; Shamsa et al., 2010; Zavaleta Juárez et al., 2024).

En la cuantificación de extractos, el tratamiento T1, correspondiente a 5 min de ultrasonido, presentó la mayor concentración promedio de alcaloides totales (151.21 µg/mL). Este comportamiento sugiere que una exposición corta puede favorecer la liberación de metabolitos, probablemente por ruptura parcial de tejidos y mejora de la transferencia de masa entre la matriz vegetal y el solvente, efecto característico de la cavitación acústica (Panda & Manickam, 2019; Fajardo-Contreras et al., 2022; Aung & Das, 2025).

El tratamiento T2, con 10 min de ultrasonido, presentó una concentración promedio de 140.03 µg/mL, mientras que T3, con 15 min, registró 118.30 µg/mL. Aunque estos valores fueron superiores al control en términos descriptivos para T1 y T2, la tendencia descendente a partir de 10 y 15 min indica que el incremento del tiempo no necesariamente se traduce en mayor recuperación de alcaloides, lo que coincide con la necesidad de optimizar variables de sonicación para evitar pérdida de eficiencia o afectación de compuestos sensibles (Rojas et al., 2019; Seguil Mirones et al., 2020; Sun et al., 2025).

El tratamiento T4, con 30 min de sonicación, presentó la menor concentración promedio de alcaloides totales (55.84 µg/mL), valor considerablemente inferior al control sin ultrasonido. Este resultado indica que la exposición prolongada puede ser contraproducente, posiblemente por degradación, transformación química o afectación de la estabilidad de los alcaloides debido a la energía ultrasónica y al incremento local de temperatura durante el proceso (Fajardo-Contreras et al., 2022; Tobar-Delgado, 2022; Aung & Das, 2025).

Cuadro 2. Concentración promedio de alcaloides totales por tratamiento

Tratamiento	Tiempo	Media (µg/mL)	Desv. estándar	Grupo Tukey
T0	0 min	111.17	18.83	A
T1	5 min	151.21	20.01	A
T2	10 min	140.02	20.57	A
T3	15 min	118.30	7.49	A
T4	30 min	55.84	3.56	B

Fuente: Elaboración propia con base en los resultados experimentales y prueba Tukey-Kramer.

El ANOVA mostró diferencias significativas entre tratamientos ($F = 16.43$; $p = 0.0002$), lo que confirma que el tiempo de sonicación influyó sobre la concentración de alcaloides extraídos. Desde una perspectiva experimental, este resultado demuestra que la variable tiempo debe considerarse crítica en el diseño de protocolos de extracción asistida por ultrasonido, ya que modifica la respuesta química del extracto y puede favorecer o disminuir la recuperación de metabolitos (Hernández-Rodríguez et al., 2020; Seguil Mirones et al., 2020; De Zan & Caro, 2024).

La prueba de Tukey-Kramer agrupó a T0, T1, T2 y T3 dentro del mismo grupo estadístico, lo cual indica que los tratamientos de 5 a 15 min no difirieron significativamente del control bajo las condiciones evaluadas. En consecuencia, aunque T1 mostró el mayor promedio, el incremento observado no fue estadísticamente suficiente para afirmar una mejora consistente frente a la extracción convencional; esta distinción es importante para evitar sobreinterpretar diferencias descriptivas sin respaldo estadístico (Skoog et al., 2018; De Zan & Caro, 2024).

El tratamiento T4 se ubicó en un grupo estadístico diferente y con menor concentración, lo que confirma que 30 min de ultrasonido redujeron significativamente la recuperación de alcaloides. Este resultado representa el hallazgo más sólido del estudio, ya que evidencia un límite operativo: aumentar el tiempo de sonicación por encima de cierto umbral puede deteriorar el desempeño extractivo y comprometer la calidad química del extracto (Fajardo-Contreras et al., 2022; Sun et al., 2025).

Desde el enfoque de bioinsumos, los resultados aportan una señal técnica relevante: la aplicación de ultrasonido debe evaluarse como una herramienta de optimización y no como una mejora automática del proceso. Para el desarrollo de extractos vegetales con potencial fungicida, la eficiencia extractiva debe equilibrarse con la estabilidad del metabolito, la reproducibilidad del proceso, el costo operativo y la seguridad de la formulación final (Mesa et al., 2019; Tobar-Delgado, 2022; Zaker, 2016).

La relación entre contenido de alcaloides y posible actividad antifúngica requiere validación posterior mediante bioensayos, ya que una mayor concentración química no garantiza por sí misma mayor eficacia biológica ni inocuidad. En futuras etapas será necesario evaluar actividad contra fitopatógenos de importancia agrícola, establecer curvas dosis-respuesta,

analizar fitotoxicidad y definir criterios de estandarización para extractos de A. ochroleuca orientados a formulaciones agrícolas (Badaracco et al., 2020; León-Islas et al., 2025; Zavaleta Juárez et al., 2024).

La representación gráfica de la curva de calibración permite observar que la señal aumenta con la concentración del estándar; sin embargo, la dispersión de los puntos muestra que el desempeño analítico debe fortalecerse antes de utilizar el método como criterio definitivo de calidad. En términos editoriales, este resultado debe presentarse como una base comparativa del experimento y no como validación completa del método (De Zan & Caro, 2024; Zavaleta Juárez et al., 2024).

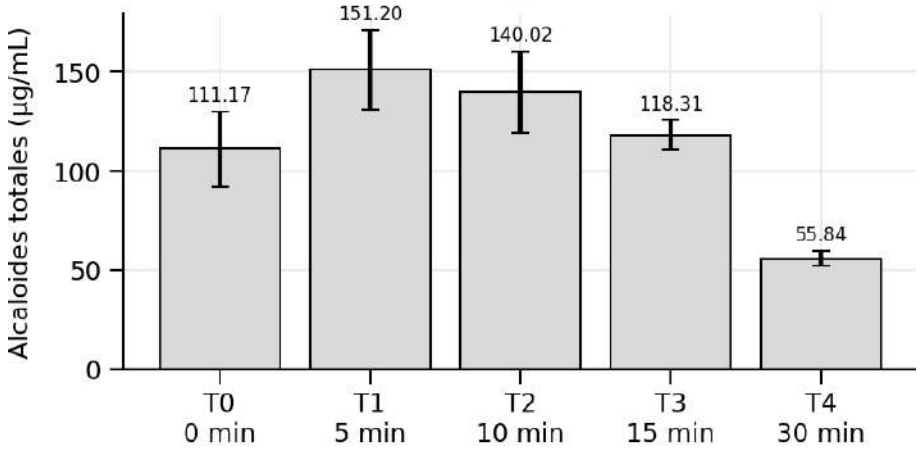


Figura 2. Respuesta de alcaloides totales al tiempo de sonicación

La Figura 2 evidencia que el mayor promedio se obtuvo a 5 min, pero la prueba de comparación múltiple impide afirmar que este tratamiento sea superior al control. En cambio, la reducción a 30 min sí constituye una diferencia estadística clara, por lo que el mensaje técnico central es que la sobreexposición al ultrasonido afecta negativamente la recuperación de alcaloides (Seguil Mirones et al., 2020; Sun et al., 2025).

Implicaciones para el desarrollo de bioinsumos

Los resultados tienen implicaciones directas para el diseño de procesos de extracción orientados a bioinsumos, ya que muestran que el ultrasonido puede modificar la concentración de alcaloides, pero no necesariamente mejora de forma significativa la extracción frente al método convencional. Por ello, el uso de baño ultrasónico debe considerarse dentro de una ruta de optimización experimental y no como un sustituto

automático de los métodos tradicionales (Abubakar & Haque, 2020; Hernández-Rodríguez et al., 2020).

Para una formulación vegetal con potencial agrícola, la concentración de alcaloides totales podría incorporarse como indicador preliminar de calidad; sin embargo, debe complementarse con perfiles químicos más específicos, pruebas de estabilidad, evaluación toxicológica y bioensayos contra fitopatógenos. Esto es especialmente importante en A. ochroleuca, porque sus alcaloides pueden presentar actividad biológica relevante, pero también riesgos asociados a dosis y forma de aplicación (Hernández-Ruiz et al., 2020; Mlombo et al., 2025).

Desde una perspectiva de agronegocios, la identificación de tiempos de extracción eficientes puede reducir costos de procesamiento, consumo energético y variabilidad del producto. No obstante, el resultado obtenido indica que tiempos prolongados de ultrasonido no son convenientes para alcaloides totales, por lo que un eventual escalamiento debe concentrarse en intervalos cortos y en el control de temperatura, potencia y solvente (Tobar-Delgado, 2022; Sun et al., 2025).

Limitaciones y recomendaciones metodológicas

El estudio ofrece una base experimental relevante para comparar tiempos de sonicación, pero debe reconocerse que la evaluación se centró en alcaloides totales y no en la identificación individual de compuestos. Por ello, la señal espectrofotométrica debe interpretarse como una aproximación global del contenido alcaloidal y no como evidencia directa de la concentración de sanguinarina, berberina, protopina u otros alcaloides específicos (Sreevidya & Mehrotra, 2003; Shamsa et al., 2010; Zavaleta Juárez et al., 2024).

En términos de optimización del proceso, los siguientes estudios deberían evaluar simultáneamente el tiempo de sonicación, la potencia, la temperatura, la relación sólido-líquido y el tipo de solvente mediante diseños factoriales o superficies de respuesta. Este enfoque permitiría identificar condiciones de extracción más robustas y evitar conclusiones parciales basadas en una única variable operacional (Hernández-Rodríguez et al., 2020; Fajardo-Contreras et al., 2022; Sun et al., 2025).

Conclusiones

El baño ultrasónico influyó significativamente en la concentración de alcaloides totales extraídos de *A. ochroleuca*; sin embargo, el efecto dependió del tiempo de sonicación y no siguió una relación lineal positiva.

El tratamiento de 5 min presentó la mayor concentración promedio de alcaloides totales, pero no fue estadísticamente diferente del control sin ultrasonido ni de los tratamientos de 10 y 15 min, por lo que no puede afirmarse que el ultrasonido corto mejore de forma significativa la extracción bajo las condiciones evaluadas.

El tratamiento de 30 min redujo significativamente la concentración de alcaloides, lo que indica que la sobreexposición al ultrasonido puede afectar negativamente la recuperación de estos metabolitos, posiblemente por degradación, transformación química o pérdida de estabilidad.

Para avanzar hacia el desarrollo de bioinsumos agrícolas, se recomienda optimizar de manera conjunta tiempo, potencia, temperatura, solvente y relación sólido-líquido, además de validar la actividad antifúngica, la inocuidad y la estabilidad de los extractos obtenidos.

Literatura citada

Abubakar, A. R., & Haque, M. (2020). Preparation of medicinal plants: Basic extraction and fractionation procedures for experimental purposes. Journal of Pharmaceutical and Bioallied Sciences, 12(1), 1–10.

Aung, T., & Das, S. K. (2025). Ultrasonic assisted medicinal plant extraction: The review. World Journal of Advanced Research and Reviews, 27(2), 1348–1359.

Badaracco, P., Sortino, M., & Pioli, R. N. (2020). Estudio de compuestos vegetales con potencial acción antifúngica sobre patógenos de plantas cultivadas. Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences, 36(3), 244–252. https://doi.org/10.29393/CHJAAS36-23ECPB30023

De Zan, M. M., & Caro, Y. S. (2024). Desarrollo e implementación de nuevos métodos analíticos en el marco estratégico de la calidad analítica por diseño y la gestión del ciclo de vida. Revista Científica ANMAT, 5, e65.

Del Puerto Rodríguez, A. M., Suárez Tamayo, S., & Palacio Estrada, D. E. (2014). Efectos de los plaguicidas sobre el ambiente y la salud. Revista Cubana de Higiene y Epidemiología, 52(3), 372–387.

Fajardo-Contreras, J. D., Sánchez Plaza, F. A., Dueñas Rivadeneira, J. P., & Dueñas Rivadeneira, A. A. (2022). Extracción asistida por ultrasonido y su aplicación en la obtención de aceites vegetales. Centro Azúcar, 49(4).

Hernández Martínez, A. L., Cervantes Jauregui, J. A., Cruz Cruz, D., & Villegas Gómez, C. (2020). "Chicalote" Argemone ochroleuca Sweet: La gran fábrica de alcaloides. Naturaleza y Tecnología, 1–8.

Hernández-Rodríguez, S., Quiroz-Reyes, C. N., Ramírez-Ortiz, M. E., Ronquillo-de-Jesús, E., & Aguilar-Méndez, M. A. (2020). Optimización del proceso de extracción asistida por ultrasonido de compuestos fenólicos. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 23(1), 1–10.

Hernández-Ruiz, J., Bernal, J., Ruiz-Nieto, J. E., Gonzales-Castañeda, J., & Mireles-Arriaga, A. I. (2020). Argemone ochroleuca (Papaveraceae), alkaloid potential source for agricultural and medicinal uses. Tropical and Subtropical Agroecosystems, 23(2).

Juárez-García, R. A., Sanzón-Gómez, D., Ramírez-Santoyo, L. F., & Gonzales-Castañeda, J. (2020). Revisión: El género Argemone (Papaveraceae) y los usos para el control de plagas en el sector agrícola. Ciencia e Innovación Agroalimentaria, 1(2), 71–83.

León-Islas, N. G., Aquino-Torres, E., Espitia-López, J., Rivero-Pérez, N., & Madariaga-Navarrete, A. (2025). Extractos de plantas como herramientas potenciales en el control de plagas y fitopatógenos en la agricultura. Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP, 11(21/22), 1–8. https://doi.org/10.29057/icap.v11i21.14144

Mesa, V. A. M., Marín, P., Ocampo, O., Calle, J., & Monsalve, Z. (2019). Fungicidas a partir de extractos vegetales: una alternativa en el manejo integrado de hongos fitopatógenos. RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias, 45(1), 23–30.

Mlombo, N. T., Makhubu, F. N., Dube, Z. P., & Tshikalange, T. E. (2025). Potential use of Argemone ochroleuca Sweet and Argemone mexicana Linn as alternative pesticide: A systematic review on their biological activity and phytochemistry. Physiological and Molecular Plant Pathology, 136, 102534. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2024.102534

Panda, D., & Manickam, S. (2019). Cavitation technology—The future of greener extraction method: A review. Applied Sciences, 9(4), 766.

Pérez, Y., Vázquez, L. L., & Miranda, I. (2014). Los plaguicidas: impactos sobre el ambiente, la salud y la sociedad. Revista de Protección Vegetal, 29(3), 135–146.

Rojas, T., Fuentes Campos, M. E., Contreras-López, E., Gómez, S., & Muñoz-Jáuregui, A. M. (2019). Extracción asistida por ultrasonido de compuestos fenólicos de la cáscara de sanky (Corryocactus brevistylus). Revista de la Sociedad Química del Perú, 85(2), 258–267.

Seguil Mirones, C., Egas Peña, E., Avilez Hinostroza, J., Blas Buendía, C., & Huamanlazo Zurita, M. (2020). Evaluación de la extracción de alcaloides de la semilla de tarwi (Lupinus mutabilis), por microondas, ultrasonido y convencional. Journal of Agri-Food Science, 1(1), 37–46.

Shamsa, F., Monsef, H., Ghamooshi, R., & Verdian-rizi, M. (2010). Spectrophotometric determination of total alkaloids in some Iranian medicinal plants. Journal of Applied Horticulture, 12(1), 69–70.

Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2018). Principios de análisis instrumental (6ª ed.). Cengage Learning.

Sreevidya, N., & Mehrotra, S. (2003). Spectrophotometric method for estimation of alkaloids precipitable with Dragendorff's reagent in plant materials. Journal of AOAC International, 86(6), 1124–1127.

Sun, S., Yu, Y., Jo, Y. J., Han, J. H., Xue, Y., Cho, M., Bae, S. J., Ryu, D., Park, W., Ha, K. T., & Zhuang, S. (2025). Impact of extraction techniques on phytochemical composition and bioactivity of natural product mixtures. Frontiers in Pharmacology, 16, 1615338.

Tobar-Delgado, M. E. (2022). Extracción asistida por ultrasonido de compuestos fenólicos a partir de cáliz de uchuva (Physalis peruviana L.) y formulación de sistemas liposomales como método de encapsulación [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia].

Zaker, M. (2016). Natural plant products as eco-friendly fungicides for plant diseases control: A review. The Agriculturists, 14(1), 134–141.

Zavaleta Juárez, M. E., Castillo Saavedra, E. F., La Cunza Méndez, A. D., Noriega Oblitas, J. M., & Reyes Alfaro, C. E. (2024). Validación de un método analítico para la cuantificación de alcaloides totales. Revista Cubana de Medicina Militar, 53(2).

Evaluación del potencial de *Trichoderma* sp. para el biocontrol de hongos fitopatógenos asociados al cultivo de maíz en la Orinoquía colombiana

Nathali López Cardona[16], Gloria Patricia Barrera Cubillos[17], Alejandro Villabona Gélvez, Jorge Luis Cárdenas Huérfano

Resumen

Los síntomas causados por hongos fitopatógenos constituyen una de las principales limitantes para la producción de maíz a nivel mundial. En un contexto de cambio climático y con el objetivo de disminuir la dependencia a los agroquímicos, la búsqueda de alternativas de manejo basadas en microorganismos cobra importancia. En este estudio se evaluó el potencial de cepas de *Trichoderma* sp. como agentes de biocontrol frente a hongos fitopatógenos asociados al cultivo de maíz. Se emplearon las cepas Th032 y Th406, cuyo inóculo se produjo sobre una mezcla de arroz y salvado de trigo y se recuperó mediante suspensión en Tween 80 y filtración. Posteriormente, se realizaron ensayos de biocontrol en condiciones de invernadero utilizando plantas de maíz sometidas a diferentes retos con *Fusarium oxysporum*, *F. verticillioides*, *F. equiseti* y *Macrophomina phaseolina*. Los tratamientos con *Trichoderma* sp. se establecieron mediante aplicaciones de suspensiones conidiales en diferentes momentos del desarrollo del cultivo, y se realizó un seguimiento periódico de la aparición y evolución de síntomas. Los resultados mostraron que la incorporación de *Trichoderma* sp. redujo la incidencia y severidad de los síntomas asociados a los patógenos evaluados en comparación con los tratamientos inoculados únicamente con los agentes fitopatógenos. Estos resultados evidencian el potencial de las cepas evaluadas de *Trichoderma* sp. como herramientas de biocontrol para reducir el impacto de enfermedades fúngicas en maíz y respaldan su evaluación posterior bajo condiciones de campo y frente a diferentes escenarios de interacción planta-patógeno-microorganismo benéfico.

Palabras clave: Hongos fitopatógenos, maíz (*Zea mays*), *Trichoderma* sp., control biológico

Abstract

Symptoms caused by plant-pathogenic fungi constitute one of the major constraints to maize production worldwide. In the context of climate change and with the aim of reducing dependence on agrochemicals, the search for management alternatives based on beneficial microorganisms is

[16] La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia. C.I. La Libertad, Km 17 vía Puerto López, Meta, Colombia. Correo electrónico: nlopezc@agrosavia.co; avillabona@agrosavia.co; jcardenas@agrosavia.co

[17] La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia. C.I. Tibaitatá, Km 14 vía Mosquera-Bogotá, Cundinamarca, Colombia. Correo electrónico: gbarrera@agrosavia.co

becoming increasingly important. In this study, the potential of *Trichoderma* sp. strains as biocontrol agents against plant-pathogenic fungi associated with maize was evaluated. Th032 and Th406 strains were used, and inoculum was produced on a mixture of rice and wheat bran and recovered by suspension in Tween 80 followed by filtration. Subsequently, biocontrol assays were conducted under greenhouse conditions using maize plants challenged with *Fusarium oxysporum*, *F. verticillioides*, *F. equiseti*, and *Macrophomina phaseolina*. *Trichoderma* sp. treatments were established through applications of conidial suspensions at different stages of crop development, and the occurrence and progression of symptoms were monitored periodically. The results showed that the application of *Trichoderma* sp. reduced the incidence and severity of symptoms associated with the evaluated pathogens compared with treatments inoculated exclusively with the respective plant pathogens. These findings demonstrate the potential of the evaluated *Trichoderma* sp. strains as biocontrol tools for reducing the impact of fungal diseases in maize and support their further evaluation under field conditions and across different plant–pathogen–beneficial microorganism interaction scenarios.

Keywords: Plant-pathogenic fungi, maize (*Zea mays*), *Trichoderma* sp.,

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) constituye uno de los cultivos de mayor importancia agrícola y alimentaria a nivel mundial, en 2024 se produjeron 1.218 millones de toneladas (FAO, 2024) debido a su amplio uso como alimento humano, fuente de alimentación animal y materia prima para múltiples industrias. Sin embargo, la productividad del cultivo se encuentra limitada por diversos factores bióticos, entre los cuales las enfermedades causadas por hongos fitopatógenos representan una amenaza recurrente para la estabilidad y sostenibilidad de la producción, especialmente en países en desarrollo como Colombia (Jeger et al., 2021). La incidencia y severidad de estas enfermedades pueden variar en función del potencial genético de los cultivares, las condiciones ambientales y las prácticas agronómicas (Różewicz et al., 2021), y su impacto puede extenderse desde la reducción del establecimiento y vigor de las plantas hasta pérdidas significativas de rendimiento y calidad del grano.

Entre los principales grupos de hongos asociados con enfermedades del maíz se encuentran especies de los géneros *Fusarium* y *Macrophomina*, capaces de afectar diferentes órganos de la planta y ocasionar enfermedades de importancia agronómica (White, 1999). El género *Fusarium* comprende un amplio conjunto de especies fitopatógenas que pueden producir enfermedades vasculares, pudriciones de raíz y tallo, y pudriciones de mazorca y grano (Atabaki et al., 2018). En maíz, *Fusarium verticillioides* es uno de los principales patógenos asociados con pudriciones de mazorca y grano, además de constituir un importante productor de fumonisinas, micotoxinas de relevancia para la inocuidad alimentaria y la salud animal (N et al., 2021). Asimismo, especies como *Fusarium oxysporum* y *Fusarium equiseti* han sido asociadas con enfermedades radiculares y vasculares y con diferentes procesos de deterioro de plantas de maíz, dependiendo de las condiciones ambientales y de la interacción específica entre hospedero y patógeno (Figueroa-Rivera et al., 2010).

Por otra parte, *Macrophomina phaseolina* es un patógeno ampliamente distribuido y con un amplio rango de hospederos, asociado con la pudrición carbonosa (*charcoal rot*). Este patógeno puede ocasionar pudrición de raíces y tallos, comprometiendo la absorción y transporte de agua y nutrientes y favoreciendo el debilitamiento y volcamiento de las plantas. La enfermedad puede adquirir particular importancia bajo condiciones de altas temperaturas y estrés hídrico (Marquez et al., 2021; White, 1999). En consecuencia, los escenarios agrícolas caracterizados por periodos de sequía y rotación de cultivos transitorios podrían favorecer la aparición de síntomas asociados con *M. phaseolina*.

El manejo convencional de enfermedades fúngicas en cultivos agrícolas se ha basado ampliamente en el uso de fungicidas y otros productos de síntesis química. Si bien estas herramientas pueden contribuir al control de numerosas enfermedades, su uso intensivo y prolongado puede estar asociado con problemas como la selección de poblaciones de patógenos resistentes, efectos adversos sobre organismos no objetivo y contaminación ambiental (Degani et al., 2023). Por esta razón, el desarrollo de estrategias complementarias que permitan reducir la presión de los patógenos mediante mecanismos biológicos ha adquirido relevancia, integrándose en programas de manejo integrado de enfermedades y disminuyendo la dependencia de agroquímicos.

Entre los microorganismos con mayor potencial para el control biológico de enfermedades vegetales se encuentran especies pertenecientes al género *Trichoderma*. Este grupo de hongos filamentosos se caracteriza por su amplia distribución en ambientes agrícolas y naturales y por su capacidad para interactuar con las plantas y con otros microorganismos del suelo y la rizosfera. Diferentes especies de *Trichoderma* han sido estudiadas como agentes de biocontrol debido a la diversidad de mecanismos mediante los cuales pueden limitar el desarrollo de microorganismos fitopatógenos tales como el micoparasitismo, la competencia por espacio y nutrientes, la producción de metabolitos con actividad antifúngica, la secreción de enzimas hidrolíticas y la inducción de respuestas de defensa en la planta hospedera (Tyśkiewicz et al., 2022; Saravanakumar et al., 2015; Sehim et al., 2023).

Este estudio fue hecho en La Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA y financiado por Fontagro mediante el proyecto *Aprovechamiento de bioproductos para fortalecer la resiliencia climática.* En él se evaluó, bajo condiciones de invernadero, el potencial de las cepas Th032 y Th406 de *Trichoderma* sp. como agentes de biocontrol frente a cuatro hongos fitopatógenos asociados con el cultivo de maíz: *F. oxysporum*, *F. verticillioides*, *F. equiseti* y *M. phaseolina*. Se analizó el efecto de la aplicación de suspensiones conidiales de *Trichoderma* sp. realizadas en diferentes momentos del desarrollo del cultivo sobre la incidencia y severidad de los síntomas inducidos por los patógenos. La hipótesis planteada fue que la aplicación de las cepas evaluadas de *Trichoderma* sp. podría reducir el desarrollo de síntomas en plantas de maíz sometidas al desafío con los diferentes patógenos. De esta manera, el estudio busca aportar evidencia experimental sobre el potencial de estas cepas como herramientas de biocontrol y generar información que contribuya al desarrollo posterior de estrategias de manejo integrado de enfermedades fúngicas del maíz.

Materiales y métodos

Identificación molecular de aislamientos benéficos y patogénicos

Los aislamientos de *Trichoderma* spp. se obtuvieron a partir de muestras de suelo micorrízico. El ADN genómico se obtuvo de esporas únicas tras lisis mecánica y amplificación del genoma completo (WGA) llevada a cabo mediante un enfoque de amplificación por desplazamiento múltiple (MDA), utilizando cebadores aleatorios resistentes a exonucleasas y una ADN polimerasa phi29 modificada (phi29-XT), lo que permitió una amplificación no selectiva a partir de cantidades reducidas de ADN. El ADN amplificado se cuantificó satisfactoriamente para su posterior secuenciación e identificación molecular.

Además, se realizó la identificación molecular de aislados de hongos fitopatógenos obtenidos de cultivos de maíz de la Orinoquía colombiana. La identificación se llevó a cabo mediante el análisis de secuencias concatenadas de ITS y TEF para los aislamientos de los que se sospechaba de *Fusarium* spp. y *M. phaseolina* fue identificada con base en secuencias de LSU.

Ensayos de fitopatogenicidad

Se realizó un ensayo de patogenicidad en condiciones de invernadero para evaluar la virulencia de los aislados fitopatógenos de suelo seleccionados en plántulas de maíz (variedad DEKALB 7088) en bandejas de plantulación. Cada patógeno fue inoculado en el sustrato con 25 mL por alveolo a una concentración de 10^4 conidios/mL siete días antes de la siembra de semillas de maíz pregerminadas, con el propósito de favorecer su establecimiento previo a la emergencia de las plantas. A las plantas control se les agregó 25 mL de agua destilada. Las plantas se mantuvieron bajo condiciones de casa de malla en Villavicencio, Meta, Colombia (temperatura promedio de 25,5 °C y humedad relativa promedio anual de 80% (Ahumada et al., 2012)) y fueron evaluadas siete días después de la siembra mediante observaciones de análisis destructivo de los sistemas radicales y la parte aérea.

Ensayos de biocontrol

En casa de malla, la actividad de biocontrol de los aislados seleccionados de *Trichoderma* sp. se evaluó en plantas de maíz cultivadas en sustrato previamente inoculado con los hongos fitopatógenos, 14 días antes de la siembra, con el propósito de favorecer el establecimiento de los patógenos. Se sembraron semillas de maíz pregerminadas en el sustrato previamente colonizado y se evaluó el efecto de los aislados de *Trichoderma* sp. (Th406 y Th032) mediante variables de biomasa vegetal. Los aislados de *Trichoderma* sp. se aplicaron mediante suspensiones conidiales ajustadas a una concentración de 10^6 conidios/mL. La suspensión se incorporó al sustrato en dos momentos: siete días antes de la siembra, para favorecer el establecimiento de los agentes de biocontrol y su interacción temprana con los patógenos, y nuevamente al momento de la siembra, mediante la aplicación de 50 mL de suspensión por alveolo. A las plantas control se les agregó 50 mL de agua destilada. Las respuestas de las plantas se evaluaron una semana después de la siembra con el peso seco de la raíz y la parte aérea.

Resultados y discusión

El análisis filogenético permitió agrupar los aislados de *Fusarium* con cepas de referencia. Dos aislados fueron clasificados como *Fusarium verticillioides* (>85 % de soporte), uno se agrupó con *Fusarium oxysporum* y otro con *Fusarium equiseti*, ambos con un soporte del 100 %. Las bajas distancias genéticas entre los aislados y las cepas de referencia confirmaron la fiabilidad de la asignación taxonómica a nivel de especie (Figura 1). *Macrophomina phaseolina* fue identificada con base en secuencias de LSU, mostrando hasta un 100 % de identidad, una cobertura de la consulta del 98–99 % y valores de E de 0,0 en el análisis Nucleotide BLAST (https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi).

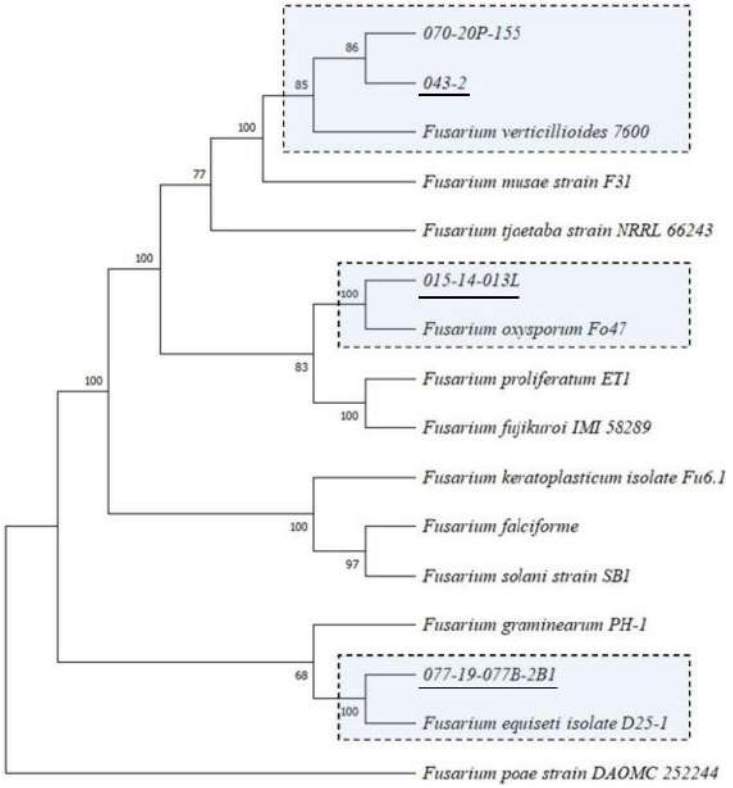


Figura 1. Árbol filogenético basado en secuencias concatenadas de ITS y TEF que muestra la relación entre aislados de hongos fitopatógenos obtenidos de maíz en la Orinoquía colombiana y cepas de referencia de GenBank. Los aislamientos usados para las pruebas de patogenicidad y biocontrol están subrayadas.

Para los ensayos de patogenicidad los siete días de la siembra se observaron diferencias claras en el crecimiento de la parte aérea entre las plantas control y aquellas inoculadas con los diferentes hongos fitopatógenos de suelo. Sin embargo, durante esta etapa temprana de desarrollo no se observaron síntomas foliares típicos, como clorosis o pudrición del tallo. Debido a que los hongos fitopatógenos de suelo colonizan inicialmente los tejidos radicales, las plantas fueron sometidas a un análisis destructivo para evaluar los síntomas en raíces y corona, donde se evidenciaron con mayor claridad los efectos de la infección.

Las plantas control presentaron un desarrollo uniforme de la parte aérea, hojas verdes y completamente expandidas, así como un sistema radical vigoroso y sin signos de necrosis. En contraste, las plantas inoculadas con *M. phaseolina* presentaron síntomas tempranos de infección radical, caracterizados por oscurecimiento de los tejidos de la corona y la raíz primaria, reducción del volumen del sistema radical y presencia de áreas necróticas localizadas. La inoculación con *F. equiseti* ocasionó una reducción visible del crecimiento de la parte aérea y el desarrollo de un sistema radical más fino y menos ramificado, evidenciando una virulencia intermedia. Los daños más severos se observaron en las plantas inoculadas con *F. oxysporum*, las cuales presentaron menor tamaño, hojas más delgadas y una necrosis radical pronunciada, acompañada de decoloración y deterioro estructural de los tejidos. Por su parte, las plantas inoculadas con *F. verticillioides* mostraron efectos intermedios, caracterizados por reducción del crecimiento aéreo, lesiones radicales localizadas y necrosis del tejido cortical, compatibles con una virulencia moderada bajo las condiciones experimentales evaluadas (Figura 2).

Los resultados cualitativos fueron respaldados por el análisis cuantitativo del crecimiento vegetal. Se detectaron diferencias significativas en el peso seco de la parte aérea entre los tratamientos (DMS, $\alpha = 0,05$), con los valores medios más altos registrados en las plantas control. *F. oxysporum* produjo la mayor reducción de la biomasa seca aérea, seguido por *F. verticillioides* y *F. equiseti*, que ocasionaron reducciones intermedias. En contraste, *M. phaseolina* presentó un efecto menos pronunciado sobre el peso seco de la parte aérea (Figura 3).

En cuanto al peso seco de las raíces, no se detectaron diferencias significativas entre los tratamientos. No obstante, se observó una tendencia hacia menores valores en las plantas inoculadas con los patógenos, particularmente en aquellas inoculadas con *F. oxysporum* y *M. phaseolina*. En conjunto, estos resultados sugieren que, durante las primeras etapas de desarrollo de las plántulas, los efectos de la infección se manifestaron principalmente a nivel del sistema radical, mientras que la reducción de la biomasa de la parte aérea podría reflejar consecuencias indirectas derivadas de la alteración de la función radical (Figura 3).

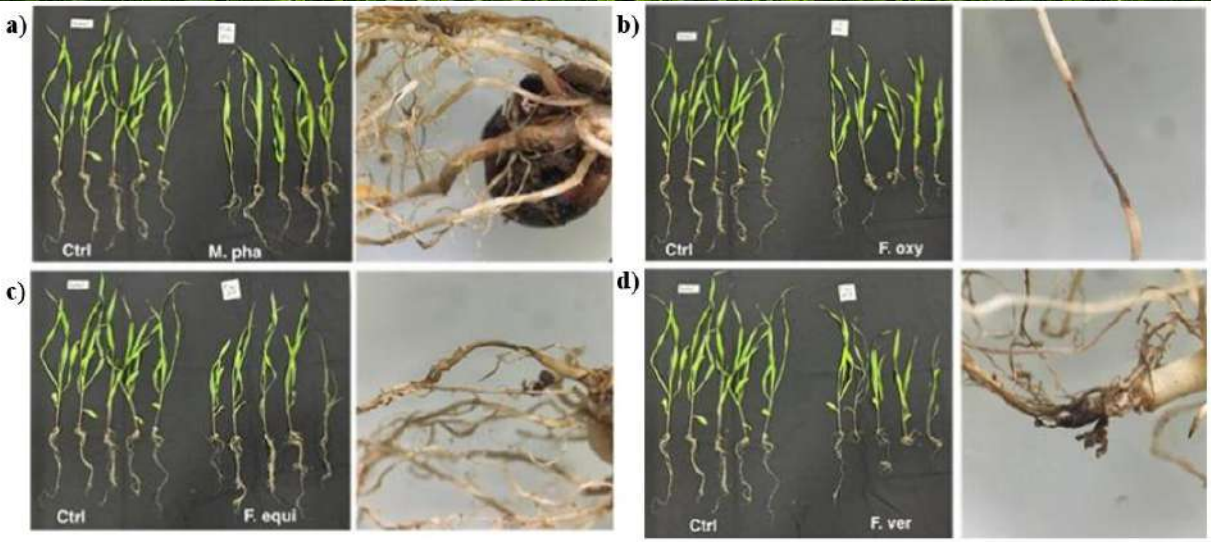


Figura 2. Síntomas de enfermedad causados por (a) *M. phaseolina*, (b) *F. oxysporum*, (c) *F. equiseti* y (d) *F. verticillioides* en plantas de maíz de una semana de edad. Los paneles de la izquierda muestran las respuestas de la planta completa, mientras que los paneles de la derecha presentan síntomas representativos en las raíces. Ctrl: suelo sin inóculo patogénico.

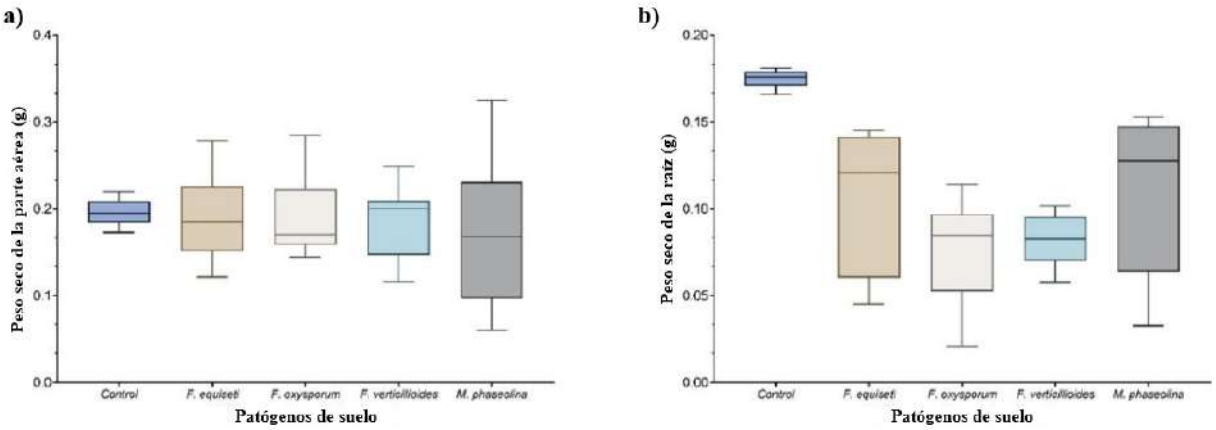


Figura 3. Efecto de los tratamientos con patógenos habitantes del suelo sobre la biomasa de maíz durante las primeras etapas de crecimiento. (a) Peso seco de la parte aérea y (b) peso seco de las raíces de plantas de maíz de una semana de edad cultivadas en suelo previamente inoculado con diferentes hongos fitopatógenos. Las cajas representan el rango intercuartílico (Q1–Q3), las líneas horizontales indican la mediana y los bigotes muestran los valores mínimo y máximo. Las plantas control fueron

cultivadas en suelo libre de patógenos. No se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para el peso seco de la parte aérea ni para el peso seco de las raíces en esta etapa (ANOVA de dos vías, $p > 0,05$).

La inoculación con los patógenos produjo una reducción de la biomasa vegetal en comparación con el control absoluto, reflejada tanto en el peso seco de las raíces como en el peso seco de la parte aérea. La magnitud de esta reducción varió según el patógeno evaluado: en particular, *M. phaseolina* y *F. oxysporum* estuvieron asociados con las mayores disminuciones en el peso seco de las raíces, mientras que *F. verticillioides*, *F. oxysporum* y *M. phaseolina* ocasionaron reducciones marcadas en el peso seco de la parte aérea (Figura 4). La aplicación de los aislados de *Trichoderma* mitigó estos efectos en todos los sistemas planta–patógeno evaluados. En presencia de *M. phaseolina*, tanto Th406 como Th032 incrementaron el peso seco de la parte aérea en comparación con el tratamiento inoculado únicamente con el patógeno, siendo Th406 el tratamiento que presentó los valores más altos. Una tendencia similar se observó para el peso seco de las raíces, indicando una recuperación significativa de la biomasa vegetal (diferencia mínima significativa (DMS), $\alpha = 0,05$) (Figura 4). Esto se podría deber a que las cepas de *Trichoderma* tendrían mecanismos de antagonismo directo contra *M. phaseolina* como lo descrito por Shekhar y Kumar (2008), donde análisis *in-vitro* mostraron reducción en el crecimiento del patógeno y formación de sus estructuras.

En las plantas inoculadas con *F. verticillioides*, los tratamientos con *Trichoderma* incrementaron significativamente tanto el peso seco de las raíces como el de la parte aérea con respecto al tratamiento inoculado únicamente con el patógeno. Este incremento de la biomasa sugiere una atenuación del efecto negativo del patógeno y una mejora del desempeño de las plantas bajo condiciones de biocontrol, esto se asemeja a los resultados obtenidos por Jambhulkar et al. (2021), en el que cepas de *Trichoderma* mostraron inhibición de crecimiento y síntomas en campo causados por *F. verticillioides*. En el caso de *F. oxysporum*, la inoculación con el patógeno produjo una de las mayores reducciones en el peso seco de las raíces. La incorporación de *Trichoderma*, particularmente del aislado Th406, dio lugar a un incremento significativo de la biomasa radical en comparación con el tratamiento inoculado únicamente con el patógeno, alcanzando valores cercanos o incluso superiores a los del control absoluto. El peso seco de la parte aérea siguió una tendencia similar, evidenciando una recuperación sustancial del crecimiento de las plantas. Estos resultados son similares a los obtenidos por Chávez-Días, et al. (2021), en el que plantas inoculadas con *Trichoderma* y distintas especies de *Fusarium* tuvieron una recuperación de biomasa semejantes a las plantas control, lo que demostraría el potencial de las cepas de *Trichoderma* para reducir el efecto de los patógenos, posiblemente mediante micoparasitismo.

Finalmente, en los tratamientos inoculados únicamente con *F. equiseti* se observó una menor biomasa respecto al control absoluto, especialmente en el peso seco de la parte aérea. La aplicación de los aislados de *Trichoderma* incrementó tanto el peso seco de las raíces como el de la parte aérea en comparación con el tratamiento del patógeno solo, demostrando un efecto protector bajo las condiciones experimentales evaluadas (Figura 4).

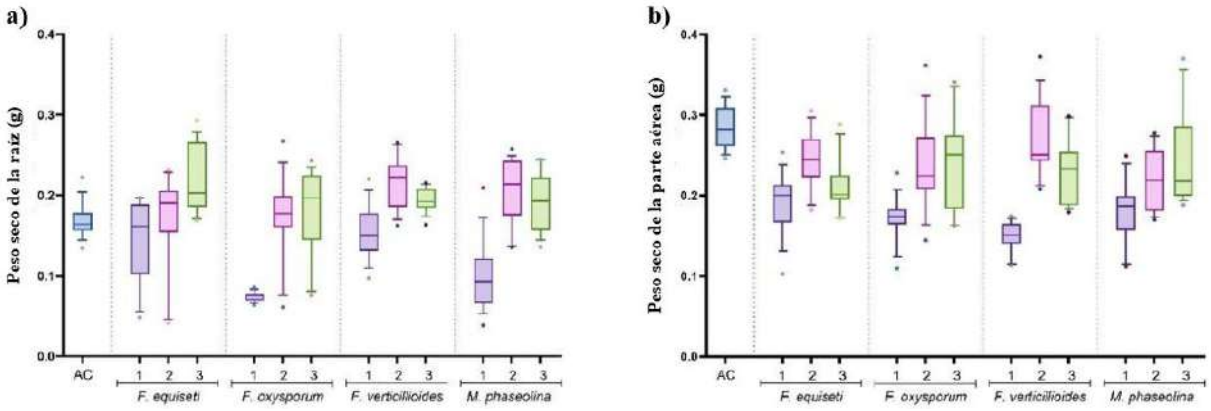


Figura 4. Efecto de los tratamientos con *Trichoderma* sobre la acumulación de biomasa de plantas de maíz cultivadas en suelo inoculado con diferentes patógenos. (a) Peso seco de las raíces y (b) peso seco de la parte aérea de plantas de maíz. Para cada patógeno, los tratamientos corresponden a: (1) patógeno solo, (2) patógeno + *Trichoderma* Th032 y (3) patógeno + *Trichoderma* Th406. AC = control absoluto (suelo no inoculado). Las cajas representan el rango intercuartílico (Q1–Q3), las líneas horizontales indican la mediana y los bigotes muestran los valores mínimo y máximo. Los puntos representan plantas individuales.

Conclusiones

Los resultados obtenidos evidenciaron que los aislamientos de *F. oxysporum*, *F. verticillioides*, *F. equiseti* y *M. phaseolina* afectan negativamente el desarrollo temprano de plantas de maíz en los cultivos de la Orinoquía colombiana, con diferencias en la intensidad de los efectos sobre el sistema radical y la biomasa aérea. Entre los patógenos evaluados, *F. oxysporum* presentó el mayor impacto sobre el crecimiento de las plántulas. La aplicación de los aislados Th032 y Th406 de *Trichoderma* sp. mitigó los efectos negativos de los patógenos y favoreció la recuperación de la biomasa radical y aérea en los diferentes sistemas planta-patógeno evaluados. Estos resultados respaldan el potencial de ambas cepas como agentes de biocontrol y justifican su evaluación posterior bajo condiciones de campo y mediante ensayos que permitan determinar su eficacia en diferentes etapas del desarrollo del cultivo y, en caso de seguir obteniendo resultados similares, poder contar con alternativas que disminuyan el uso de agroquímicos.

Literatura citada

Ahumada, M. L., Pareja, P. X., Buitrago, L. S., & Quiñones, M. L. (2012). Comportamiento de picadura de *Anopheles darlingi* Root, 1926 (Diptera: Culicidae) y su asociación con la transmisión de malaria en Villavicencio (Meta, Colombia). *Biomédica*, *33*(2), 241-250. https://doi.org/10.7705/biomedica.v33i2.1492

Atabaki, N., Rahjoo, V., Hanafi, M. M., Abiri, R., Zadeh, H. Z., Zamani, M., Sahebi, M., & Valdiani, A. (2018). Morpho-Molecular Identification, Pathogenicity Variation, Mating Biology, and Fumonisin Production of Fusarium Species in Zea mays L. *International Journal Of Phytopathology*, *7*(1), 31-49. https://doi.org/10.33687/phytopath.007.01.2528

Chávez-Díaz, I. F., Rios-Galicia, B., Blanco-Camarillo, M., Cruz-Cárdenas, C. I., Sandoval-Cancino, G., Rojas-Anaya, E., … Zelaya-Molina, L. X. (2021). Maize landrace rhizospheric fungi with biocontrol potential against four different *Fusarium* species complexes. *Biocontrol Science and Technology*, *31*(7), 754–772. https://doi.org/10.1080/09583157.2021.1885012

Degani, O., Gordani, A., Dimant, E., Chen, A., & Rabinovitz, O. (2023). The cotton charcoal rot causal agent, Macrophomina phaseolina, biological and chemical control. *Frontiers In Plant Science*, *14*, 1272335. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1272335

FAO (2024). FAOSTAT: Production data. Crops and livestock products. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado el 22 de julio de 2026 de https://www.fao.org/faostat/en/

Figueroa-Rivera, María Guadalupe, Rodríguez-Guerra, Raúl, Guerrero-Aguilar, Brenda Zulema, González-Chavira, Mario Martín, Pons-Hernández, Jose Luis, Jiménez-Bremont, Juan Francisco, Ramírez-Pimentel, Juan Gabriel, Andrio-Enríquez, Enrique, & Mendoza-Elos, Mariano. (2010). Caracterización de Especies de Fusarium Asociadas a la Pudrición de Raíz de Maíz en Guanajuato, México. *Revista mexicana de fitopatología*, *28*(2), 124-134. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092010000200005&lng=es&tlng=es.

Jambhulkar, P. P., Raja, M., Singh, B., Katoch, S., Kumar, S., & Sharma, P. (2021). Potential native Trichoderma strains against Fusarium verticillioides causing post flowering stalk rot in winter maize. Crop Protection, 152, 105838. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105838

Jeger, M., Beresford, R., Bock, C., Brown, N., Fox, A., Newton, A., Vicent, A., Xu, X., & Yuen, J. (2021). Global challenges facing plant pathology: multidisciplinary approaches to meet the food security and environmental challenges in the mid-twenty-first century. *CABI Agriculture And Bioscience*, *2*(1). https://doi.org/10.1186/s43170-021-00042-x

Marquez, N., Giachero, M. L., Declerck, S., & Ducasse, D. A. (2021). Macrophomina phaseolina: General Characteristics of Pathogenicity and Methods of Control. *Frontiers In Plant Science*, *12*, 634397. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.634397

N, D., Achar, P. N., & Sreenivasa, M. Y. (2021). Current Perspectives of Biocontrol Agents for Management of *Fusarium verticillioides* and Its Fumonisin in Cereals—A Review. *Journal of Fungi*, *7*(9), 776. https://doi.org/10.3390/jof7090776

Różewicz, M., Wyzińska, M., & Grabiński, J. (2021). The Most Important Fungal Diseases of Cereals—Problems and Possible Solutions. *Agronomy*, *11*(4), 714. https://doi.org/10.3390/agronomy11040714

Saravanakumar, K., Yu, C., Dou, K., Wang, M., Li, Y., & Chen, J. (2015). Synergistic effect of Trichoderma-derived antifungal metabolites and cell wall degrading enzymes on enhanced biocontrol of Fusarium oxysporum f. sp. cucumerinum. Biological Control, 94, 37-46. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2015.12.001

Sehim, A. E., Hewedy, O. A., Altammar, K. A., Alhumaidi, M. S., & Elghaffar, R. y. A. (2023). Trichoderma asperellum empowers tomato plants and suppresses Fusarium oxysporum through priming responses. *Frontiers In Microbiology*, *14*, 1140378. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1140378

Shekhar, M., & Kumar, S. (2008). Potential biocontrol agents for the management ofmacrophomina phaseolina, incitant of charcoal rot in maize. *Archives Of Phytopathology And Plant Protection, 43*(4), 379-383. https://doi.org/10.1080/03235400701806419

Tyśkiewicz, R., Nowak, A., Ozimek, E., & Jaroszuk-Ściseł, J. (2022). Trichoderma: The Current Status of Its Application in Agriculture for the Biocontrol of Fungal Phytopathogens and Stimulation of Plant Growth. *International Journal Of Molecular Sciences*, *23*(4), 2329. https://doi.org/10.3390/ijms23042329

White, D. G. (1999). Compendium of corn diseases 3rd ed. *St. Paul: American Phytopathological Society*.

Obtención de extractos de cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante cromatografía flash automatizada, caracterización espectroscópica FT-IR y espectrométrica LC-MS

Francisco Alexander Venegas-Escarcega[18], Holber Zuleta-Prada[19], Teodoro Espinosa-Solares[20], Emanuel Hernández-Núñez[21]

Resumen

La cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) constituye un subproducto agroindustrial de alta disponibilidad cuyo aprovechamiento puede contribuir a la valorización de residuos y a la recuperación de metabolitos de interés. El objetivo de este trabajo fue obtener extractos de diferente polaridad de cáscara de cacao variedad Carmelo, fraccionarlos mediante cromatografía flash automatizada y caracterizar su composición mediante FTIR-ATR y cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas de alta resolución (LC-MS). El material vegetal se secó hasta reducir su humedad de 71.71 % a 11.04 % y posteriormente se sometió a extracción secuencial con hexano, diclorometano, acetato de etilo y metanol. Los rendimientos obtenidos fueron 0.217 %, 0.24 %, 0.39 % y 0.60 %, respectivamente. Los extractos se fraccionaron en fase normal con un sistema Isolera™ One empleando un gradiente de hexano hacia acetato de etilo. Los espectros FTIR-ATR mostraron bandas asociadas con grupos O–H, C–H alifáticos, carbonilos y enlaces C–O. El análisis por UPLC–Xevo G2-XS QTOF permitió la anotación tentativa de metabolitos con errores de masa de 1.2–5.2 ppm. Se detectaron ácidos grasos y esfingolípidos en el extracto hexánico; flavonoides y ácidos fenólicos en diclorometano; catequina, epicatequina y procianidinas en acetato de etilo; y teobromina, cafeína, procianidina C1 y derivados glucosilados en metanol. Se concluye que la polaridad del solvente determinó una recuperación diferencial de metabolitos, y que esta estrategia permite seleccionar fracciones químicamente diferenciadas para estudios posteriores de actividad biológica y valorización de la cáscara de cacao como fuente potencial de compuestos de interés agroalimentario.

[18] Laboratorio de Productos Naturales, Departamento de Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo, km. 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México. C.P. 56230
[19] Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Departamento de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo, km. 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, Estado de México. C.P. 56230
[20] Laboratorio de Bioprocesos, Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, 56230, Estado de México, México
[21] Departamento de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico Superior de Calkiní (ITESCAM), Calkiní, Campeche, México

Palabras clave: *Theobroma cacao*; cromatografía flash; LC-MS.

Abstract

Cocoa pod husk (*Theobroma cacao* L.) is an abundant agro-industrial by-product whose utilization may contribute to waste valorization and the recovery of metabolites of interest.The objective of this study was to obtain extracts of different polarities from cocoa pod husk of the Carmelo variety, fractionate them by automated flash chromatography, and characterize their chemical composition using FTIR-ATR and liquid chromatographycoupled to high-resolution mass spectrometry (LC-HRMS). The plant material was dried until its moisture content decreased from 71.71% to 11.04% and was subsequently subjected to sequential extraction with hexane, dichloromethane, ethyl acetate, and methanol. Extraction yields of 0.217%, 0.24%, 0.39%, and 0.60% were obtained, respectively. The extracts were fractionated under normal-phase conditions using an Isolera™ One system with a gradient from hexane to ethyl acetate. FTIR-ATR spectra showed characteristic bands associated with O–H groups, aliphatic C–H bonds, carbonyl groups, and C–O bonds. UPLC–Xevo G2-XS QTOF analysis enabled the tentative annotation of metabolites with mass errors ranging from 1.2 to 5.2 ppm. Fatty acids and sphingolipids were detected in the hexane extract; flavonoids and phenolic acids in the dichloromethane extract; catechin, epicatechin, and procyanidins in the ethyl acetate extract; and theobromine, caffeine, procyanidin C1, and glycosylated derivatives in the methanolic extract. It is concluded that solvent polarity resulted in differential metabolite recovery and that this strategy enables the selection of chemically differentiated fractions for subsequent biological activity studies and the valorization of cocoa pod husk as a potential source of compounds of agro-food interest.

Keywords: *Theobroma cacao*; flash chromatography; LC-MS.

Introducción

La cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) constituye uno de los principales subproductos generados durante el procesamiento del fruto y representa una fracción considerable de la biomasa residual producida por la agroindustria chocolatera. Aunque tradicionalmente se ha considerado un residuo de aprovechamiento limitado, su composición química ha despertado interés debido a la presencia de compuestos fenólicos, flavonoides, metilxantinas, ácidos orgánicos y otros metabolitos secundarios con potencial de aplicación biológica, alimentaria y agroindustrial. En consecuencia, el aprovechamiento de esta biomasa representa una alternativa para incrementar el valor agregado de la cadena productiva del cacao y reducir la generación de residuos agroindustriales (Vriesmann et al., 2011; Cádiz-Gurrea et al., 2020).

La composición química de la cáscara de cacao es compleja y puede variar en función de factores como la variedad, el estado de maduración, las condiciones ambientales y el procesamiento del material vegetal. Debido a esta diversidad de componentes, la selección del solvente representa una etapa determinante durante el proceso de extracción. La extracción secuencial empleando disolventes con diferente polaridad permite generar extractos químicamente diferenciados y favorecer la recuperación de metabolitos de acuerdo con sus características fisicoquímicas. Solventes no polares, como el hexano, presentan mayor afinidad por componentes lipofílicos, mientras que solventes de polaridad intermedia y elevada, como diclorometano, acetato de etilo y metanol, permiten ampliar progresivamente el intervalo de metabolitos recuperados. Sin embargo, esta distribución no debe considerarse exclusiva, ya que pueden existir solapamientos entre las diferentes fracciones obtenidas (Azmir et al., 2013).

Posteriormente a la extracción, el fraccionamiento constituye una estrategia útil para disminuir la complejidad de las mezclas y facilitar su caracterización química. La cromatografía flash automatizada permite separar los componentes de un extracto mediante su interacción diferencial con una fase estacionaria y una fase móvil, utilizando gradientes de elución controlados. De esta manera, pueden obtenerse fracciones con perfiles químicos diferenciados de acuerdo con la polaridad de los compuestos presentes. La automatización del proceso proporciona además un mejor control de parámetros como el flujo, la composición del gradiente y la recuperación de las fracciones, favoreciendo la reproducibilidad experimental.

Para evaluar las características químicas de los extractos y fracciones obtenidas, la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR) constituye una técnica útil para identificar de manera preliminar los principales grupos funcionales presentes en una muestra. Mediante esta técnica es posible reconocer señales asociadas con grupos hidroxilo, enlaces C–H alifáticos, grupos carbonilo, estructuras aromáticas y enlaces C–O, permitiendo comparar los cambios observados entre extractos y fracciones de distinta polaridad (Stuart, 2004).

No obstante, debido a que FTIR-ATR proporciona principalmente información relacionada con grupos funcionales, su combinación con técnicas de espectrometría de masas permite alcanzar un mayor nivel de caracterización molecular. La cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS), particularmente mediante analizadores QTOF, permite determinar masas exactas, evaluar patrones isotópicos y obtener información de fragmentación para realizar la anotación tentativa de metabolitos presentes en matrices vegetales complejas. Este enfoque ha sido utilizado para estudiar la composición química de

subproductos del cacao y diferenciar metabolitos asociados con distintas características de la matriz vegetal (Cádiz-Gurrea et al., 2020; Gallego et al., 2022).

En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo obtener extractos secuenciales de diferente polaridad a partir de cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) variedad Carmelo mediante hexano, diclorometano, acetato de etilo y metanol, realizar su fraccionamiento mediante cromatografía flash automatizada y caracterizar su composición mediante FTIR-ATR y LC-MS. La integración de estas técnicas permitirá establecer perfiles químicos diferenciados y generar información para la selección de fracciones con potencial de aprovechamiento biológico y agroindustrial, contribuyendo a la valorización de la cáscara de cacao como fuente de metabolitos de interés.

Materiales y métodos

Preparación de extractos vegetales y su fraccionamiento cromatográfico

Las mazorcas de cacao (*Theobroma cacao* L.) variedad Carmelo fueron obtenidas en Tabasco, México, y procesadas en el Laboratorio de Productos Naturales de la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México. Las mazorcas fueron separadas manualmente en mucílago, semilla, endocarpio y epicarpio (cáscara). La cáscara se secó hasta peso constante y su contenido de humedad se determinó mediante una termobalanza MB23 (OHAUS Corporation, Nueva Jersey, EE. UU.).

El material seco fue triturado y sometido a extracción secuencial por maceración utilizando una relación 1:5 (p/v) cáscara: solvente. La extracción se realizó durante 48 h a temperatura ambiente con agitación orbital cada 12 h, empleando de manera consecutiva hexano, diclorometano, acetato de etilo y metanol. Tras cada extracción, las muestras fueron filtradas con papel filtro Whatman® No. 50 y los filtrados se concentraron a presión reducida mediante un rotavapor R-100 (Büchi Labortechnik AG, San Galo, Suiza) para obtener los extractos crudos correspondientes.

Los extractos obtenidos fueron fraccionados mediante cromatografía flash automatizada en fase normal utilizando un sistema Isolera™ One (Biotage AB, Uppland, Suecia), con detección UV-Vis a 280 nm. La separación se efectuó mediante un gradiente de elución hexano: acetato de etilo de 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 y 0:100 (v/v). Las fracciones recuperadas fueron concentradas a presión reducida mediante un rotavapor R-100 (Büchi Labortechnik AG, San Galo, Suiza) para la eliminación de los solventes de elución.

Análisis espectroscópico por FTIR-ATR

Finalmente, los extractos crudos y las fracciones recuperadas fueron caracterizados mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR) utilizando un espectrómetro Cary 630 FTIR (Agilent Technologies, California, EE. UU.). Los espectros se registraron en un intervalo de 4000–400 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} para la identificación de los principales grupos funcionales presentes en las muestras.

Análisis cualitativo de extractos crudos por LCMSD

Los extractos de cáscara de cacao se analizaron mediante un sistema ACQUITY UPLC acoplado a un espectrómetro de masas Xevo G2-XS QTOF, equipado con una columna BEH C18 (2.1 × 100 mm, 1.7 µm) mantenida a 40 °C. La separación cromatográfica se realizó empleando agua con 0.1 % de ácido fórmico como fase móvil A y acetonitrilo como fase móvil B, con un flujo de 0.35 mL/min, volumen de inyección de 1 µL y un tiempo total de análisis de 30 min. La detección se efectuó mediante ionización por electrospray en modos positivo y negativo (ESI^+/ESI^-), en un intervalo de *m/z* 50–1000 y adquisición MS^E. Se utilizaron energías de 6–13 eV para baja energía y 20–45 eV para alta energía. La corrección de masa se realizó con leucina-encefalina. La anotación tentativa de los metabolitos se estableció a partir de la masa exacta del ion precursor y sus patrones de fragmentación, considerando un error de masa aceptable ≤5 ppm.

Resultados y discusión

La humedad de la cáscara de mazorca de cacao disminuyó de 71.71 % a 11.04 % después del secado. Los rendimientos de extracción aumentaron con la polaridad del solvente, obteniéndose 0.217 % para hexano, 0.24 % para diclorometano, 0.39 % para acetato de etilo y 0.60 % para metanol, lo que sugiere una mayor abundancia de metabolitos polares y de mediana polaridad en la matriz vegetal.

Los espectros FTIR-ATR de los extractos secuenciales de cáscara de cacao (Theobroma cacao L.) variedad Carmelo y sus respectivas fracciones (Figuras 1–4) evidenciaron diferencias en la distribución de grupos funcionales asociadas a la polaridad del solvente extractor y del sistema de elución. En todas las muestras se identificaron bandas características de grupos O–H (3400–3200 cm^{-1}), C–H alifáticos (2920–2850 cm^{-1}), carbonilos (1700–1600 cm^{-1}) y enlaces C–O (1250–1000 cm^{-1}), asociados a compuestos fenólicos, ésteres y otros metabolitos secundarios de origen vegetal (Stuart, 2004). El extracto hexánico (Figura 1) mostró un predominio de señales alifáticas, mientras que los extractos

diclorometánico y de acetato de etilo (Figuras 2 y 3) presentaron una mayor intensidad de bandas asociadas a compuestos oxigenados. Asimismo, las variaciones observadas entre los extractos crudos y sus fracciones, particularmente en la región de huella digital (1500–800 cm^{-1}), evidenciaron una separación efectiva de metabolitos durante el fraccionamiento cromatográfico. Para el extracto metanólico (Figura 4), se espera una mayor contribución de grupos hidroxilo y enlaces C–O debido a la extracción preferencial de compuestos fenólicos y otros metabolitos polares (Okiyama *et al*., 2017).

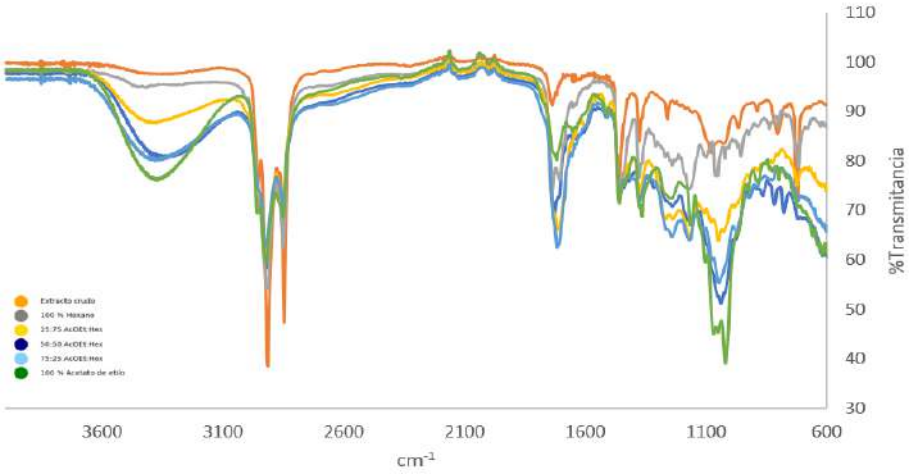


Figura 1. Espectros FTIR-ATR del extracto hexánico crudo y de las fracciones obtenidas mediante cromatografía flash automatizada de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao* L.) variedad Carmelo.

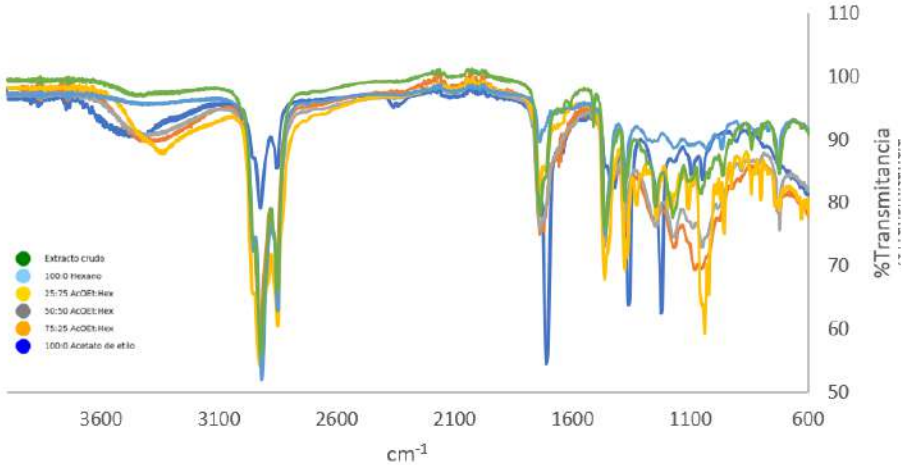


Figura 2. Espectros FTIR-ATR del extracto de diclorometano crudo y de las fracciones obtenidas por cromatografía flash automatizada de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao* L.) variedad Carmelo.

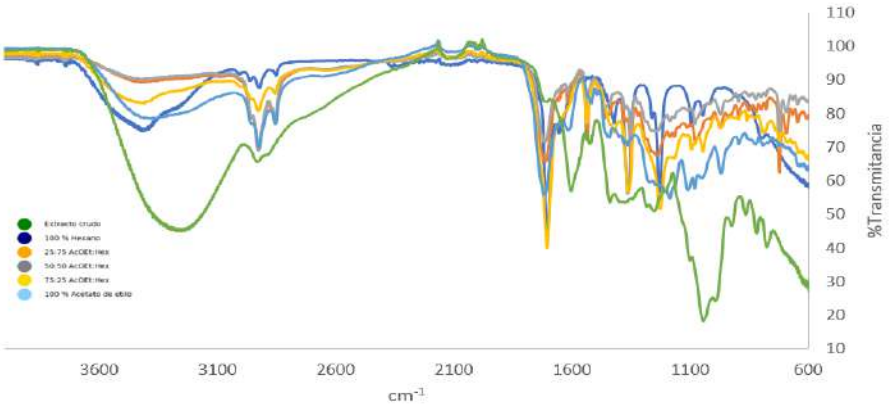


Figura 3. Espectros FTIR-ATR del extracto de acetato de etilo crudo y de las fracciones obtenidas mediante cromatografía flash automatizada de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao* L.) variedad Carmelo.

Figura 4. Espectros FTIR-ATR del extracto metanoico crudo y de las fracciones obtenidas mediante cromatografía flash automatizada de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao* L.) variedad Carmelo.

El análisis de los extractos de cáscara de cacao mediante espectrometría de masas de alta resolución utilizando un sistema XEVO G2-XS QTOF permitió establecer un perfil químico diferencial en función de la polaridad del solvente de extracción. La asignación tentativa de los compuestos se realizó considerando la fórmula molecular propuesta, el ion precursor detectado, el patrón de fragmentación y el error de masa expresado en partes por millón (ppm). En conjunto, los extractos hexánico, diclorometánico, de acetato de etilo y metanólico mostraron la presencia de diferentes clases de metabolitos, incluyendo ácidos grasos y esfingolípidos en las fracciones menos polares, así como ácidos fenólicos, flavonoides, procianidinas, metilxantinas y derivados glicosilados en las fracciones de mayor polaridad. La mayoría de las asignaciones presentaron errores de masa cercanos o inferiores a 5 ppm, lo que proporciona soporte instrumental para la identificación propuesta; sin embargo, dichas asignaciones deben considerarse tentativas en ausencia de comparación directa con estándares analíticos auténticos. (Tabla 1 a 4).

Tabla 1. Análisis por XEVO G2 XS QTOF Extracto hexánico de cáscara de cacao

Compuesto candidato	Fórmula molecular	Ion precursor de referencia	Fragmentos	Error experimental (ppm)
Heptadecaesfinganina	$C_{17}H_{37}NO_2$	288.2894 ($[M+H]^+$)	106.08; 88.08	4.2
Fitoesfingosina	$C_{18}H_{39}NO_3$	318.2999 ($[M+H]^+$)	300.28; 282.27; 270.27; 252.26; 60.04	3.2
Ácido 9,12,13-trihidroxioctadecenoico	$C_{18}H_{34}O_5$	329.2335 ($[M-H]^-$)	229.14; 211.13; 171.10; 139.11	5.1
Ácido oleico	$C_{18}H_{34}O_2$	281.2489 ($[M-H]^-$)	152.99	5
Ácido linoleico	$C_{18}H_{32}O_2$	279.2319 ($[M-H]^-$)	259.24; 231.21	4.6
Ácido linolénico	$C_{18}H_{30}O_2$	277.2160 ($[M-H]^-$)	220.11; 181.01	4

Tabla 2. Análisis por XEVO G2 XS QTOF Extracto diclorometano de cáscara de cacao

Compuesto candidato	Fórmula molecular	Ion precursor teórico	Fragmentos	Error experimental (ppm)
Ácido ferúlico	$C_{10}H_{10}O_4$	193.0506 ($[M-H]^-$)	178.027; 149.061; 134.037	4.2
Naringenina	$C_{15}H_{12}O_5$	271.0612 ($[M-H]^-$)	151.004; 119.050; 107.013	1.2
Apigenina	$C_{15}H_{10}O_5$	269.0455 ($[M-H]^-$)	225.056; 151.004; 117.034	3
Luteolina	$C_{15}H_{10}O_6$	285.0405 ($[M-H]^-$)	175.040; 151.004; 133.029	3
Kaempferol	$C_{15}H_{10}O_6$	285.0405 ($[M-H]^-$)	255.030; 227.035; 151.004	3.2
Resveratrol	$C_{14}H_{12}O_3$	227.0714 ($[M-H]^-$)	185.061; 159.045; 143.050	2.1
Ácido protocatecuico	$C_7H_6O_4$	153.0193 ($[M-H]^-$)	109.029	4
Ácido azelaico	$C_9H_{16}O_4$	187.0976 ($[M-H]^-$)	169.086; 143.107; 125.096	5.2

Tabla 3. Análisis por XEVO G2 XS QTOF Extracto acetato de etilo de cáscara de cacao

Compuesto candidato	Fórmula molecular	Ion precursor de referencia	Fragmentos	Error experimental (ppm)
Ácido protocatecuico	$C_7H_6O_4$	153.0193 ($[M-H]^-$)	109.02	4.2
Catequina	$C_{15}H_{14}O_6$	289.0718 ($[M-H]^-$)	245.08; 205.05; 203.07; 179.03; 151.03; 125.02	2.3
Epicatequina	$C_{15}H_{14}O_6$	289.0718 ($[M-H]^-$)	245.08; 205.05; 203.07; 179.03; 151.03; 125.02	3.8
Procianidina tipo B	$C_{30}H_{26}O_{12}$	577.1346 ($[M-H]^-$)	407.07; 289.07; 245.08; 161.02; 125.02	4
Quercetina-3-O-arabinósido	$C_{20}H_{18}O_{11}$	433.0775 ($[M-H]^-$)	300.02; 178.99; 151	4
Apigenina-7-O-glucurónido	$C_{21}H_{18}O_{11}$	445.0775 ($[M-H]^-$)	269.04; 175.02; 113.02; 85.02	4.1
Kaempferol-3-O-pentósido	$C_{20}H_{18}O_{10}$	417.0826 ($[M-H]^-$)	284.03; 255.03; 209.04; 151	2.8

Ácido ferúlico	$C_{10}H_{10}O_4$	193.0506 ($[M-H]^-$)	178.02; 149.06; 134.03	5

Tabla 4. Análisis por XEVO G2 XS QTOF Extracto metanólico de cáscara de cacao

Compuesto candidato	Fórmula molecular	Ion precursor de referencia	Fragmentos	Error experimental (ppm)
Ácido glucónico	$C_6H_{12}O_7$	195.0505 ($[M-H]^-$)	159.029; 129.019; 75.008	5
Ácido vanílico-4-O-hexósido	$C_{14}H_{18}O_9$	329.0878 ($[M-H]^-$)	167.035; 152.011; 123.044	4.9
1-O-Siringóil-glucopiranosa	$C_{15}H_{20}O_{10}$	359.0984 ($[M-H]^-$)	197.045; 182.022; 153.055; 138.032	4.1
Teobromina	$C_7H_8N_4O_2$	181.0720 ($[M+H]^+$)	67.028	4.2
Cafeína	$C_8H_{10}N_4O_2$	195.0877 ($[M+H]^+$)	138.066; 110.072; 109.040; 83.061; 69.045	4
6,8-C-Dihexosilapigenina	$C_{27}H_{30}O_{15}$	593.1512 ($[M-H]^-$)	503.120; 473.109; 383.077; 353.067	1.2
Procianidina C1	$C_{45}H_{38}O_{18}$	865.1985 ($[M-H]^-$)	695.139; 577.135; 407.077; 289.072; 243.040; 161.028	1.5
Quercetina-3-O-glucósido	$C_{21}H_{20}O_{12}$	463.0882 ($[M-H]^-$)	300.028; 178.998; 161.045	1.8
Ácido cítrico	$C_6H_8O_7$	191.0197 ($[M-H]^-$)	111.0088; 87.0088; 85.0295	1.6

Conclusión

Los resultados obtenidos evidencian que la extracción secuencial con solventes de diferente polaridad permitió generar perfiles químicos diferenciados a partir de la cáscara de mazorca de cacao (*Theobroma cacao* L.) variedad Carmelo. El fraccionamiento mediante cromatografía flash automatizada favoreció la separación de los componentes de los extractos, mientras que FTIR-ATR permitió identificar diferencias en los principales grupos funcionales presentes. Complementariamente, el análisis por LC-MS permitió realizar la anotación tentativa de diversos metabolitos, incluyendo ácidos grasos, flavonoides, compuestos fenólicos, procianidinas y metilxantinas. En conjunto, la integración de estas técnicas constituye una estrategia útil para seleccionar fracciones químicamente diferenciadas y establecer bases para posteriores estudios de actividad biológica, identificación estructural y aprovechamiento agroindustrial. Estos resultados contribuyen a la valorización de la cáscara de cacao como una fuente potencial de metabolitos de interés y representan una alternativa para el aprovechamiento integral de este subproducto de la cadena productiva del cacao.

Literatura citada

Azmir, J., Zaidul, I. S. M., Rahman, M. M., Sharif, K. M., Mohamed, A., Sahena, F., Jahurul, M. H. A., Ghafoor, K., Norulaini, N. A. N., & Omar, A. K. M. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *Journal of Food Engineering, 117*(4), 426–436. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014

Cádiz-Gurrea, M. de la L., Fernández-Ochoa, Á., Leyva-Jiménez, F. J., Guerrero-Muñoz, N., Villegas-Aguilar, M. del C., Pimentel-Moral, S., Ramos-Escudero, F., & Segura-Carretero, A. (2020). LC-MS and spectrophotometric approaches for evaluation of bioactive compounds from Peru cocoa by-products for commercial applications. *Molecules, 25*(14), 3177. https://doi.org/10.3390/molecules25143177

Gallego, A. M., Zambrano, R. A., Zuluaga, M., Camargo Rodríguez, A. V., Candamil Cortés, M. S., Romero Vergel, A. P., & Arboleda Valencia, J. W. (2022). Analysis of fruit ripening in *Theobroma cacao* pod husk based on untargeted metabolomics. *Phytochemistry, 203*, 113412. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2022.113412

Stuart, B. H. (2004). *Infrared spectroscopy: Fundamentals and applications*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/0470011149

Vriesmann, L. C., Amboni, R. D. M. C., & Petkowicz, C. L. O. (2011). Cacao pod husks (*Theobroma cacao* L.): Composition and hot-water-soluble pectins. *Industrial Crops and Products, 34*(1), 1173–1181. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.04.004

Okiyama, D. C. G., Navarro, S. L. B., & Rodrigues, C. E. C. (2017). Cocoa shell and its compounds: Applications in the food industry. Trends in Food Science & Technology, 63, 103–112. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.007

Revalorización de la Medicina Tradicional Maya a través de un enfoque científico como estrategia para la conservación del Patrimonio biocultural de Yucatán

Mar Anabel Pérez Povedano[22], Blanca Marina Vera Ku, Sergio Ruben Peraza Sánchez

Resumen

La Medicina Tradicional Maya forma parte importante del patrimonio biocultural del estado de Yucatán. En los últimos años esta práctica ancestral ha ido perdiendo relevancia, ocasionando una reducción importante en el número de practicantes y poniendo en riesgo la preservación de los saberes ancestrales del pueblo maya. Ante esta problemática el apoyo de la comunidad científica se vuelve relevante para poder darle respaldo científico y sentar las bases para la futura formalización de estas prácticas y asegurar su preservación para las generaciones futuras. Sin embargo, es necesario garantizar que los remedios y prácticas tradicionales son eficaces y seguros mediante la aplicación del método científico para desarrollar ensayos que permitan corroborar las propiedades terapéuticas que se les atribuyen. El presente trabajo se propone como un aporte para contribuir al reconocimiento y formalización de la Medicina Tradicional Maya mediante la implementación de estudios etnobotánicos, ensayos de actividad biológica y caracterización química de formulaciones medicinales mayas usadas para el tratamiento de enfermedades respiratorias. Hasta el momento se ha encontrado que las comunidades mayas poseen un amplio conocimiento de la flora medicinal lo cual confiere un nuevo valor a las especies ayudando a su preservación como cultivos de traspatio. Asimismo, se ha observado que las formulaciones estudiadas poseen un perfil fitoquímico complejo que puede explicar su capacidad para inhibir ciertos agentes patógenos causantes de enfermedades respiratorias. Estos hallazgos preliminares presentan un avance para poder respaldar, con evidencia científica, el potencial de la Medicina Tradicional Maya como una alternativa para el tratamiento de padecimientos menores.

Palabras clave: Medicina Tradicional Maya, formulaciones medicinales, etnobotánica

Abstract

Maya Traditional Medicine constitutes an important part of the biocultural heritage of the

[22] Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), Calle 43 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, 97200. Mérida, Yucatán, México. Correo electrónico: mar.perez@estudiantes.cicy.mx; marina.vera@cicy.mx; speraza@cicy.mx

state of Yucatán. In recent years, this ancestral practice has experienced a decline in relevance, resulting in a significant reduction in the number of practitioners, which threatens the preservation of the ancestral knowledge of the Maya people. In response to this issue, support from the scientific community is becoming increasingly relevant to provide scientific evidence and develop methodologies for the formalization of these practices, thereby ensuring their preservation for future generations. However, it is necessary to establish the efficacy and safety of traditional remedies and practices through the application of the scientific method and the development of appropriate assays.
The present work aims to contribute to the processes of recognition and formalization of Maya Traditional Medicine through the implementation of ethnobotanical studies, biological activity assays, and chemical characterization of Maya medicinal formulations used for the treatment of respiratory diseases. To date, it has been found that Maya communities possess extensive knowledge of medicinal flora, which confers additional value on these species and contributes to their preservation as backyard crops. Likewise, the formulations studied have been found to possess a complex phytochemical profile that may explain their ability to inhibit certain respiratory disease-causing pathogens. These preliminary findings represent progress toward providing scientific evidence supporting the potential of Maya Traditional Medicine as an alternative for the treatment of minor ailments.

Keywords: Maya Traditional Medicine; medicinal formulations; ethnobotany.

Introducción

La Medicina Tradicional (MT) es uno de los saberes mayas mejor preservados y es una parte importante del patrimonio cultural de la región (Hirose-López, 2018) ya que aún sigue presente en varias comunidades de la Península de Yucatán y en algunas de ellas es la única manera en la que la población puede atender sus problemas de salud (Méndez y Durán, 1997; Durán-García y Méndez-González, 2015). Sin embargo, con el tiempo ha ido perdiendo relevancia ya que se enfrenta a diversas amenazas como la falta de interés por aprender el oficio, el aumento de la migración hacia las ciudades principales en busca de un futuro mejor, la pérdida de recursos naturales ocasionada por la creciente urbanización, entre otras (Hirose-López, 2018).

En los últimos años ha habido un aumento en el interés de la población por recurrir a alternativas más naturales para el cuidado de la salud (Seetharaman *et al.*, 2021). La globalización y las redes sociales han permitido obtener acceso ilimitado a todo tipo de conocimiento, incluida la medicina tradicional y alternativa de diferentes culturas (Ng *et*

al., 2023), lo que ha provocado una mezcla de diferentes elementos culturales y, con ello, un desplazamiento de los sistemas de MT locales que son sustituidos por otros más populares como la MT China o la MT India. Además, nos enfrentamos al hecho de que este aumento de interés por la herbolaria tradicional no está a la par de las investigaciones científicas y, por lo tanto, los remedios herbales no están lo suficientemente estudiados ni regulados (Lee *et al.*, 2022), pudiendo ocasionar reacciones adversas en las personas que los consumen. Por ello, es necesario aumentar los esfuerzos en las investigaciones para dar respaldo científico a los sistemas de MT y evaluar aquellos productos hechos a base de plantas que la gente suele consumir (Başaran *et al.*, 2022).

Gran parte de las investigaciones en MT se enfocan en el estudio de las plantas usadas por los médicos tradicionales, pero en la MT es más común que las plantas se usen en conjunto para elaborar formulaciones poliherbales, así, la eficacia de estas preparaciones depende tanto del método de preparación como de la interacción entre las plantas componentes (Yuan *et al.*, 2016; Drašar y Moravcová, 2004) y, por ello, deberían de analizarse como un todo. Sin embargo, debido a la complejidad de los ingredientes y factores involucrados en su elaboración, aún no existe una metodología universal para su estudio (Mirzaeian *et al.*, 2019). Considerando la naturaleza holística de la MT, un enfoque multidisciplinario se plantea como la opción más adecuada para abarcar los diferentes aspectos involucrados en la efectividad de una formulación poliherbal. Después de trabajar durante muchos años con médicos tradicionales mayas yucatecos, se propone el presente trabajo con el objetivo de caracterizar formulaciones de la medicina tradicional maya usadas en el tratamiento de enfermedades respiratorias, a través del establecimiento de parámetros que pueden considerarse como punto de partida para ayudar a optimizar los protocolos de formalización de esta práctica ancestral.

Materiales y métodos

Búsqueda de formulaciones medicinales usadas para tratar enfermedades respiratorias

Se realizó una revisión bibliográfica empleando bases de datos y buscadores como SciFinder, Scopus, Clarivate Web of Science, Scholar Google y referencias impresas para encontrar formulaciones mayas usadas para tratar enfermedades respiratorias o síntomas asociados a éstas. Además, se realizaron visitas a cinco médicos tradicionales de dos comunidades del estado de Yucatán, Tibolón y Yaxcabá, en donde se realizaron entrevistas semi-estructuradas. Con la finalidad de proteger los derechos de propiedad de los médicos tradicionales, se le otorgó a cada colaborador una carta de consentimiento informado revisada y autorizada por el Instituto para el Desarrollo de la Cultura Maya del Estado de Yucatán (INDEMAYA).

Selección y procesamiento de las formulaciones

Para la elección de las formulaciones se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

1. Que se conozca la fórmula completa y el método de preparación.

2. Que sean usadas o hayan sido usadas por la población.

Una vez seleccionadas las formulaciones se colectaron las plantas que la integran para proceder a su preparación en el laboratorio. Las plantas se secaron y cortaron en trozos pequeños para después hervirlas en un litro de agua durante 20 minutos. Las preparaciones se dejaron enfriar y se filtraron con papel filtro. Se colocaron en tubos Falcon de 50 ml de capacidad y se secaron por liofilización hasta obtener el extracto seco que fue almacenado, en viales, a una temperatura de 4°C.

Se colectaron ejemplares de cada especie y se depositaron en el herbario Herbario-Fibroteca "U Najil Tikin Xiw" del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

Ensayo de inhibición de unión de proteínas S/ACE2

Para determinar el potencial de las formulaciones como tratamiento contra el virus SARS-CoV-2, se realizó un ensayo de inhibición del complejo S/ACE2, empleando un kit “COVID-19 Spike-ACE2 Binding Assay” de la marca Ray Biotech®. Como controles positivo y negativo se emplearon las soluciones incluidas en el kit. Se realizaron diluciones seriadas de las muestras para tener cuatro concentraciones diferentes: 40, 20, 10 y 5 mg/ml, de cada una de ellas se tomaron 100 µL que se adicionaron a un pocillo revestido con la proteína ACE2. La placa de 96 pocillos se dejó en incubación por 2 horas, después de lo cual se eliminó el sobrenadante y se lavó con la solución buffer de lavado para eliminar las proteínas que no se unieron al receptor. Posteriormente, a cada pocillo se le adicionaron 100 µL del anticuerpo primario Anti-IgG conjugado, y se incubaron por 1 hr a temperatura ambiente. Pasado el tiempo de incubación se repitió el proceso de eliminación y lavado y se adicionaron 100 µL de reactivo TMB en cada pocillo. La placa se dejó en incubación durante 30 minutos a temperatura ambiente, en agitación constante y en oscuridad, posteriormente se adicionaron 50 µL de solución “STOP” para detener la reacción. Finalmente, se midió la densidad óptica (DO) de las muestras y los controles para calcular el porcentaje de inhibición (% BI) empleando la siguiente fórmula:

$$\%BI = \frac{DO\ control\ positivo - DO\ muestra}{DO\ control\ positivo}\ x\ 100$$

Pruebas de suceptibilidad a antimicrobianos

Se realizaron evaluaciones para determinar la capacidad de las formulaciones para inhibir el crecimiento de tres microorganismos causantes de infecciones respiratorias: *Staphylococcus aureus* (ATCC 25923), *Pseudomonas aeruginosa* y *Mycobacterium tuberculosis*. Los ensayos de difusión en pozo se realizaron en el Laboratorio de Microbiología de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca y se hicieron por triplicado. Los cultivos se prepararon en cajas Petri usando 30 ml de medio Mueller-Hinton por placa. Las cepas de *S. aureus, K. pneumoniae* y *P. aeruginosa* fueron reactivadas tomando una alicuota de 100 µL de cada una de ellas (preservadas en glicerol) para depositarlas en un tubo con 5 ml de caldo Muller Hinton. Las preparaciones se dejaron en incubación durante 18 hr. Pposteriormente, se prepararon los inóculos con las cepas reactivadas y 5 ml de solución salina estéril al 0.9% y se ajustaron a un valor de 0.5 de la escala de McFarland. Para alcanzar este valor se adicionaron 200 µl del caldo de cultivo a la solución salina y la turbidez se fue ajustando agregando 50 µl de la cepa o de solución salina, según fuera necesario, hasta alcanzar 0.07 de absorbancia, la cual fue medida a una longitud de onda de 620 nm con la ayuda de un espectofotómetro. Los extractos evaluados fueron preparados, con agua destilada, a una concentración de 200 mg/ml. Se usaron 25 µl de extracto, kanamicina (concentración: 30 mg/ml, control positivo) y agua destilada (control negativo). Las placas inoculadas se dejaron en incubación por 17 h a 37 °C. Pasado el tiempo de incubación se midieron los halos de inhibición de los extractos que mostraron actividad.

Para reactivar *M. tuberculosi* se prepararon 10 ml de medio Middlebrook suplementado con 1 ml de OADC, se le agregaron 100 µl del glicerol bacteriano y se dejó en incubación durante 3 semanas. Al finalizar el tiempo de incubación se preparó el inóculo bacteriano siguiendo el procedimiento descrito anteriormente. Para el ensayo de susceptibilidad de *M. tuberculosis* se empleó la metodología de microdiluciones dobles seriadas en placas de 96 pocillos. Se evaluaron 5 concentraciones: 400, 200, 100, 50 y 25 mg/ml, realizando tres réplicas de cada una. Como control positivo se usaron 5 µl de rifampicina (concentración: 0.5mg/ml) y como control negativo 95 µl de caldo de cultivo inoculado con 5 µl del inóculo bacteriano. Las placas se dejaron en incubación y se hicieron lecturas de dendidad óptica a los 7, 14 y 21 días.

Caracterización química

Las formulaciones fueron analizadas por cromatografía en capa fina (TLC) y por cromatografía en capa fina de alto rendimiento (HPTLC). Para el análisis de TLC las

formulaciones FJ11, FJ13, FJ14, FJ15, LD1 y LD2 fueron preparadas al 1% (10 mg de extracto disueltos en 1 mL de agua destilada) y las formulaciones RS1, RS2 y FB2 se prepararon al 5% (50 mg de extracto en 1 mL de agua). Como fase estacionaria se usaron placas de gel de sílice de 6 x 6 cm y como fase móvil una mezcla de disolventes compuesta por butanol, ácido acético y agua, a una concentración de 50:20:30. Se aplicó 1 µL de las muestras FJ11, FJ13, FJ14, FJ15, LD1, LD2 y FB2 y 3 µL de las muestras RS1 y RS2. Las placas cromatográficas se visualizaron bajo luz UV a una longitud de onda de 366 nm. Para el análisis por HPTLC se usaron la mismas concentraciones y fase móvil de la TLC. Para la fase estacionaria se usaron placas de vidrio de 20 x 10 cm recubiertas con gel de sílice y para la derivatización se usaron los reactivos Dragendorff, p-anisaldehído, ácido fosfomolíbdico y DPPH. La visualización se hizo bajo luz UV (366 y 264 nm).

Resultados y discusión

Estudio etnobotánico

En las bases de datos electrónicas se encontraron pocas referencias sobre formulaciones medicinales, específicamente para el tratamiento de enfermedades respiratorias, no se halló información alguna. En registros impresos, sólo se encontró información sobre formulaciones en el libro The Ethno-Botany of the Maya (Roys, 1931) donde se mencionan 26 remedios usados para tratar problemas del sistema respiratorio como asma, dificultad para respirar, tos seca, dolor en el pecho, pleuresía, catarro, tisis (tuberculosis pulmonar), tos ferina, flema blanca, tos causada por asma, neumonía y comezón en la garganta. A pesar de ser una referencia antigua se pudieron identificar 62 especies (pertenecientes a 53 géneros y 25 familias) usadas para elaborar decocciones contra padecimientos respiratorios. La familia Fabaceae fue la de mayor uso en la preparación de estas formulaciones, seguida de las familias Asteraceae y Euphorbiaceae (Figura 1).

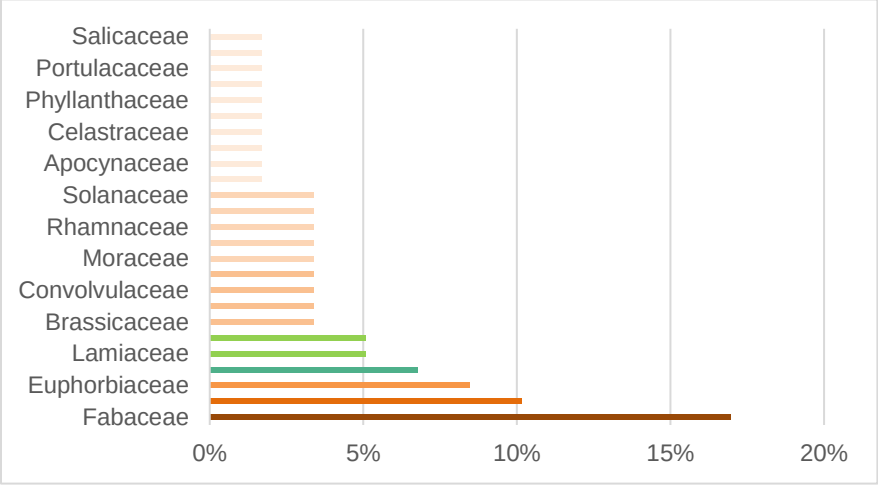


Figura 1. Familias de plantas registradas por Roys (11931) que se utilizan con más frecuencia para preparar remedios usados en el tratamiento de enfermedades respiratorias y sus síntomas y signos.

A partir de entrevistas a los Médicos Tradicionales se obtuvieron 9 formulaciones, 8 decocciones de material vegetal seco y una maceración de material fresco. Todos los entrevistados contaban con una identificación expedida por el INDEMAYA que los acredita como médicos tradicionales y todos ellos aceptaron firmar la carta de consentimiento, la cual además fue firmada por el entrevistador y por el director del INDEMAYA.

Para la elaboración de estos remedios herbolarios se emplean 26 plantas diferentes y se identificaron 24 especies,12 familias y 19 géneros. Estas plantas se usan para tratar enfermedades respiratorias y sus síntomas o signos, asociados a ellas (Cuadro 1).

Cuadro 1. Lista de plantas de mayor uso para el tratamiento de enfermedades respiratorias o síntomas asociadas a estos padecimientos.

Nombre común	Especie	Familia	Uso
Aguacate	*Persea americana*	Lauraceae	Tos seca, asma, bronquitis
Árnica	*Tithonia diversifolia*	Asteraceae	Tos seca, asma, bronquitis
Balché	*Lonchocarpus longistylus*	Fabaceae	Reforzar el sistema inmune
Canela	*Cinnamomum verum*	Lauracea	Tos, gripe
China	*Citrus x sinensis*	Rutaceae	Tos seca, asma, bronquitis
Frijolillo	*Senna atomaria*	Fabaceae	Tos seca, asma, bronquitis, sinusitis
Guayaba	*Psidium guajava*	Myrtaceae	Tos seca, asma, bronquitis, gripe, sinusitis
Hierbabuena	*Mentha spicata*	Lamiaceae	Tos, gripe
Jabín	*Piscidia piscipula*	Fabaceae	Bronquitis

Kulinsis	*Astronium graveolens*	Anacardiacea	Reforzar el sistema inmune
Limón persa	*Citrus x latifolia*	Rutaceae	Tos, gripe
Limón indio	*Citrus x aurantifolia*	Rutaceae	Tos seca, asma, bronquitis
Mandarina	*Citrus x reticulata*	Rutaceae	Tos seca, asma, bronquitis
Naranja	*Citrus x aurantium*	Rutaceae	Tos seca, asma, bronquitis
Orégano de castilla	*Plectranthus amboinicus*	Lamiaceae	Tos
Orégano común	*Lippia origanoides*	Verbenaceae	Tos, gripe
Pata de vaca	*Bauhinia divaricata*	Fabacea	Bronquitis
Romero	*Salvia rosmarinus*	Lamiaceae	Reforzar el sistema inmune
Sinanché	*Zanthoxylum caribaeum*	Rutaceae	Reforzar el sistema inmune
Sip che'	*Bunchosia swartziana*	Malpighiaceae	Reforzar el sistema inmune
Tabaco	*Nicotiana tabacum*	Solanaceae	Tos seca, asma, bronquitis
Tsintamán	*Gossypium* sp.	Malvaceae	Tos seca, gripe, asma, bronquitis
Vaporrubxiu	*Plectranthus hadiensis*	Lamiaceae	Tos ocasionada por COVID
Zacate limón	*Cymbopogon citratus*	Poaceae	Tos seca, asma, bronquitis, sinusitis, reforzar el sistema inmune

Las plantas más utilizadas fueron el zacate limón la guayaba, el limón y la naranja agria. La familia Rutaceae (Figura 2) fue la más representativa en estas preparaciones.

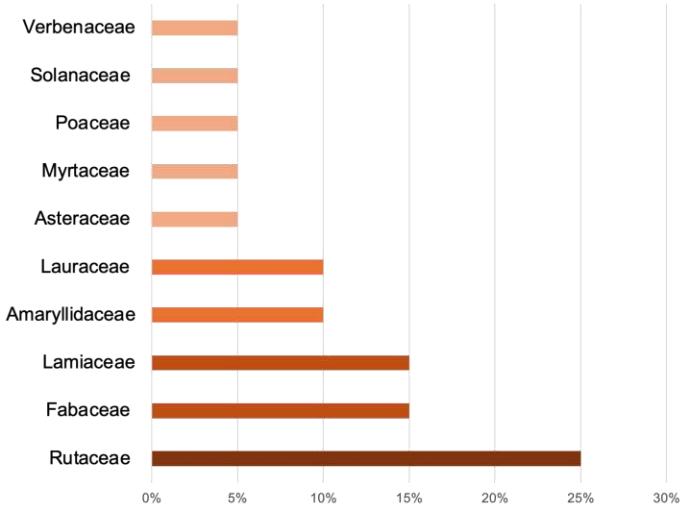


Figura 2. Familias de plantas empleadas en la elaboración de formulaciones para el tratamiento de enfermedades respiratorias

Al analizar la información obtenida a partir de literatura y de las entrevistas, se observó la complejidad para identificar el material botánico usado en la elaboración de las formulaciones, ya que una misma especie vegetal puede tener diferentes nombres comunes, además la taxonomía está en constante modificación, por lo que la información obtenida en el libro de Roys no estaba actualizada y en algunos casos no se registró el nombre científico de la planta o el nombre común no estaba escrito correctamente. Por lo anterior, se decidió seleccionar las formulaciones obtenidas directamente con los colaboradores para continuar con su estudio, ya que al colectar el material vegetal junto con ellos se evita hacer uso de una especie incorrecta.

Actividad inhibitoria de las formulaciones en la unión de la proteína S y el receptor ACE2

Se analizaron 8 formulaciones empleadas para tratar enfermedades respiratorias y sus síntomas o signos, cada una se evaluó por duplicado y se promediaron los valores de densidad óptica de cada formulación para calcular el porcentaje de inhibición de las muestras. Asimismo, se calculó el promedio de la densidad óptica del control positivo y del control de extracto.

A la concentración máxima evaluada (40 mg/ml) el porcentaje de inhibición de las ocho formulaciones es casi del 100% (Figura 3), los valores son más altos que el registrado por el extracto de hojas de guayaba. *Psidium guajava* ha reportado resultados prometedores para el tratamiento de la enfermedad producida por el virus SARS-Cov-2 (Priyandoko *et al*., 2024; Priyandoko *et al*., 2023; Shin *et al*., 2021). En una investigación realizada en 2023, se observó que un preparado que incluía hojas de guayaba reducía considerablemente los efectos del virus en la salud de ratones y mejoraba la tasa de recuperación (Do *et al*., 2023).

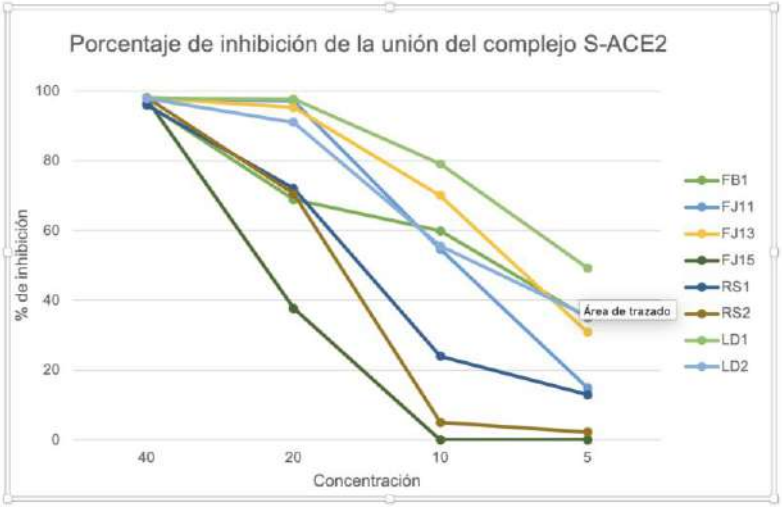


Figura 3 Actividad inhibitoria, expresada en porcentaje, de las formulaciones evaluadas

Al evaluar las formulaciones a 5 mg/ml, tres de ellas, FB1, LD1 y LD2, siguen mostrando resultados interesantes, con una inhibición de entre 35 y 49%, de éstas sólo FB1 fue indicada para usarse como tratamiento para síntomas producidos por el COVID-19. Por otro lado, aunque LD1 y LD2 no se usan para tratar directamente síntomas o signos del COVID-19, ambas tuvieron porcentajes de inhibición altos, siendo LD1, la cual contiene entre sus ingredientes hojas de guayaba, la que reportó los porcentajes de inhibición más altos a las cuatro concentraciones evaluadas.

El reino vegetal ha sido una fuente importante de metabolitos bioactivos para diferentes problemas de salud, por ello, para hacer frente a la pandemia ocasionada por el SARS-Cov-2 los investigadores recurrieron a las plantas en la búsqueda de alternativas para tratar la enfermedad COVID-19. Varias investigaciones han propuesto compuestos que pueden ser útiles para eliminar al coronavirus responsable de la pandemia. Los flavonoides, presentes en plantas del género *Citrus* (Brodowska, 2017), destacan por su amplio rango de actividades biológicas; basado en su actividad para inhibir otros coronavirus, se ha planteado su potencial como tratamiento contra el SARS-Cov-2 (Sopjani *et al*., 2024). Otros metabolitos de origen vegetal con potencial actividad contra el SARS-Cov-2 son, entre otros, la hesperidina, la diosmina y la rhoifolina. La hesperidina es característica de varios miembros del género *Citrus*, también se ha reportado su presencia en plantas del género *Mentha* (Pyrzynska, 2022) y la diosmina y

la rhoifolina están presentes en plantas del género *Citrus* (Hassanein *et al*., 2025). La rhoifolina además, se encuentra en altas concentraciones en el jugo y en diferentes partes de varios cítricos (Refaat *et al*., 2015). Dada la estrecha relación entre taxonomía y producción de MS, estos metabolitos podrían estar presentes en la preparaciones y ser responsables de la actividad inhibitoria observada.

Actividad biológica de las formulaciones frente a microorganismos patógenos causantes de enfermedades respiratorias

Las formulaciones no lograron inhibir el crecimiento bacteriano de *S. aureus* y *K. pneumonia*. Las formulaciones FJ14, FJ11 Y RS1 fueron evaluadas contra *M. tuberculosis* sin mostrar indicios de actividad inhibitoria. Por otro lado, *P aeureginosa* mostró susceptibilidad frente a las formulaciones RS1, FJ11 y FJ14 (Figuras 4)

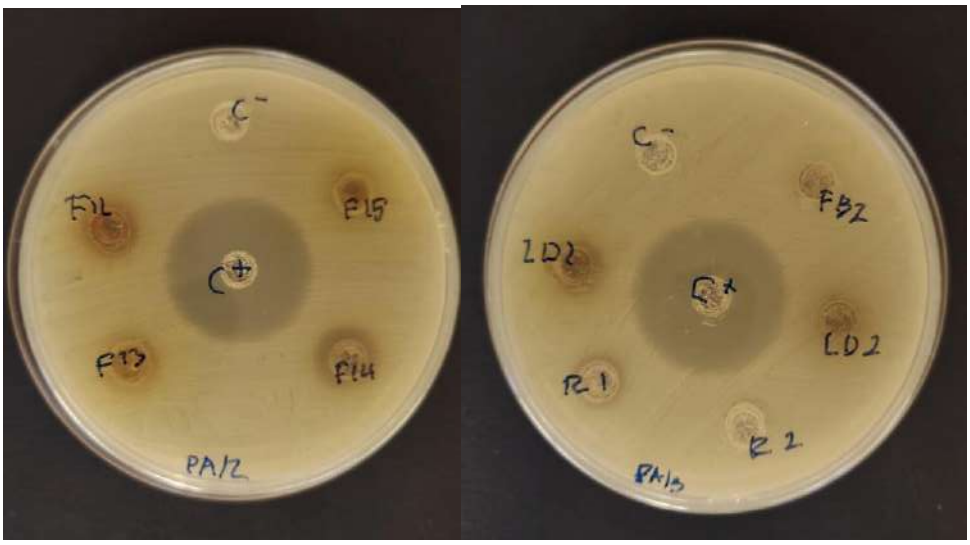


Figura 4 Actividad inhibitoria de las nueve formulaciones evaluadas a 200 mg/ml

Perfil fitoquímico de las formulaciones analizadas

Por lo general, las preparaciones herbolarias son mezclas de más de dos plantas, por lo cual, su contenido químico es una mezcla compleja de metabolitos. De las formulaciones analizadas, 8 están compuestas por tres o más ingredientes. Al ser extracciones acuosas la mayoría de su componentes químicos son metabolitos de alta polaridad, lo que dificulta la separación de estos en la zona de mayor polaridad de la placa cromatográfica, sin

embargo, en la zona de menor polaridad la composición química de las preparaciones es más definida (Figura 5). Las formulaciones FJ11, FJ13 y FJ14 comparten 5 especies: *C. aurantifolia*, *C. aurantium*, *C. x sinensis*, *C. citratus* y *P. guajava*. Probablemente debido a esto y a que se usa el mismo método de preparación, en el análisis cromatográfico por TLC se observaron componentes en común (Figura 6).

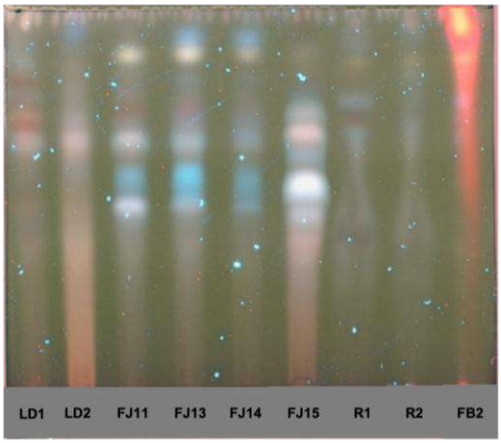


Figura 5. Análisis cromatográfico por TLC de las formulaciones evaluadas.

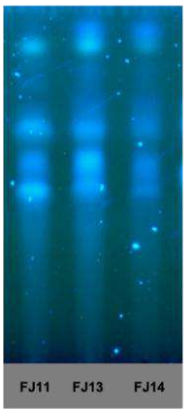


Figura 6. Perfil cromatográfico por TLC de las formulaciones FJ11, FJ13 y FJ14 visualizado bajo luz UV 365 nm.

La cromatografía en capa fina (TLC) es un método simple y efectivo que permite visualizar el perfil fitoquímico de una planta, de una parte de ella y de preparaciones

herbolarias a un bajo costo. Por ello, es uno de los análisis más empleados en el control de calidad de productos de origen vegetal porque permiten detectar adulteraciones y contaminantes y visualizar la presencia o ausencia de componentes específicos, convirtiéndola en una técnica muy útil para comprobar la autenticidad de un remedio herbolario y para la obtención de *fingerprints* (Kowalska y Sajewicz, 2022; Łata *et al*., 2020; Braz *et al*., 2012). Sin embargo, ofrece poca resolución y reproducibilidad, ya que la mayor parte del procedimiento se hace de forma manual (Monteiro *et al*., 2016), por lo tanto, técnicas más modernas como la HPTLC son utilizadas para tener una mejor resolución de perfiles fitoquímicos, como en el caso de las formulaciones evaluadas en este estudio (Figura 7), permitiendo observar mejor la complejidad del contenido químico en la zona de menor polaridad (Figura 8).

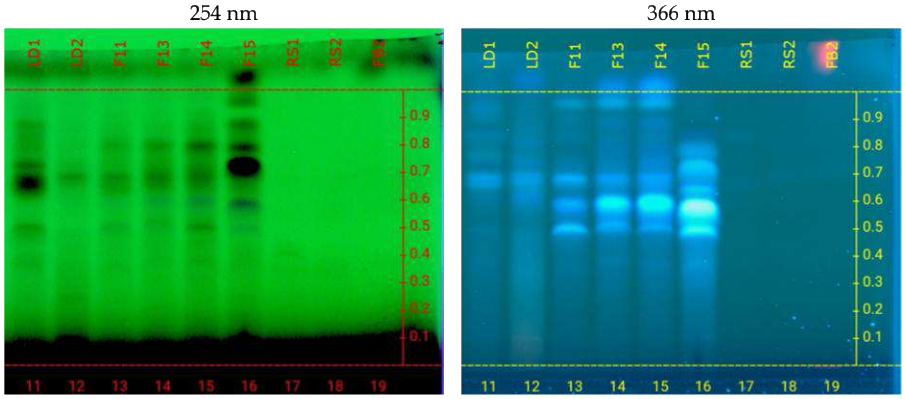


Figura 7. Perfil cromatográfico por HPTLC de las nueve formulaciones visualizado bajo dos longitudes de onda de luz UV: 254 y 365 nm.

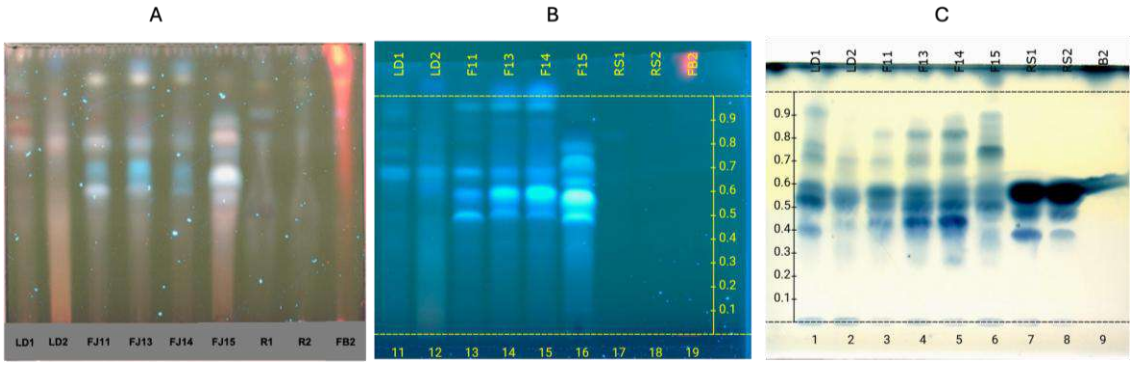


Figura 8. Comparación de los perfiles cromatográficos por TLC (A) y HPTLC (B y C) de las nueve formulaciones. Visualización: luz UV, 365 nm. Derivatización: ácido fosfomolíbdico (C).

Los diferentes reactivos usados para visualizar los perfiles cromatográficos sugieren la presencia de polifenoles y metabolitos con actividad antioxidante (Figuras 9 A y 10), mientras que el reactivo Draggendorff, ayudó a descartar la presencia de alcaloides en las formulaciones (Figura 9 B).

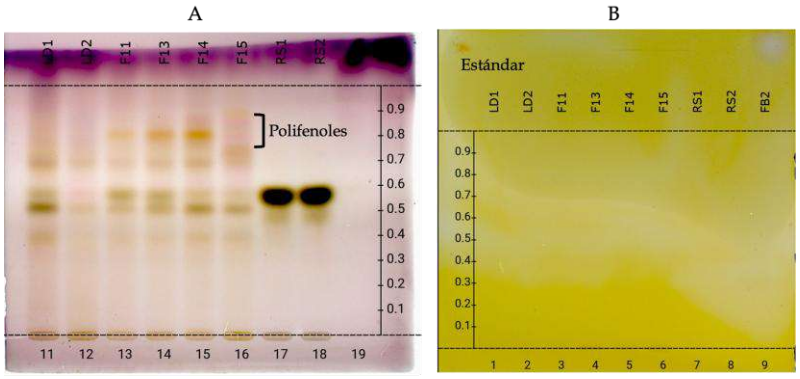


Figura 9. Perfiles fitoquímicos obtenidos por HPTLC de las formulaciones estudiadas. Derivatización: p-anisaldehído (A) y reactivo Draggendorff (B).

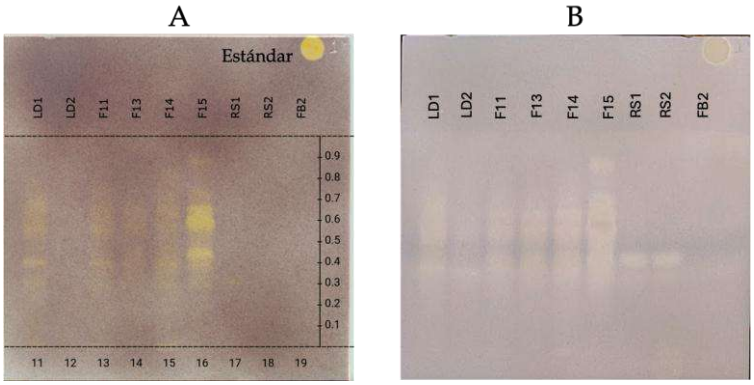


Figura 10. Actividad antioxidante de los componentes químicos presentes en las formulaciones visualizada a los 10 minutos (A) y a las 24 h (B) de la aplicación del reactivo (DPPH).

Para la elaboración de las formulaciones se emplean 24 especies vegetales, la mayoría

son conocidas y usadas con fines terapéuticos y alimenticios, por lo tanto, hay un amplio registro fitoquímico de éstas. En las hojas de aguacate se ha reportado la presencia de polifenoles, oxalatos, fitatos, saponinas, taninos, terpenoides y flavonoides, como por ejemplo persina, quercetina, azfelina, escopoletina (Juma, 2025; Yasir *et al*., 2010). En las hojas de la hierbabuena se ha reportado, entre otros, eriodictiol, eravaciclina, kaempferol, ferreirina, hesperidina, ginkgólido C, 4-hidroxicumarina, safingol, meprednisona, ramnocitrina, eriodictiol-7-O-glucósido, Alamandina, Trans-5-O-(4-cumaroil)-D-quinato y Lisofosfatidiletanolamina 16:0. Estos últimos 6 compuestos sólo se encontraron en hojas secas (Li y Tian, 2018). Por su parte, de las hojas del árnica se han aislado compuestos bioactivos como nerolidol A, neofitadieno, pentatriacontano, fenilalanina, ácido indolacrílico, gilluona B, tagitinina A, tirotundina, tadeonal, acrilato de tridecilo, glucósido de estigmastero, entre otros (Almayda *et al*., 2025; Roopa *et al*., 2020).

Algunas especies del género *Citrus* son muy usadas por la población y son una fuente de flavonoides (hesperidina, naringina, narirutina, nobiletina, tangeretina), terpenos (limoneno, linalol, mirceno, tujanol, timol), alcaloides (sinefrina, octopamina, tiramina, *N* -metiltiramina, hordenina, ácido *N*- metilnicotínico), carotenoides (violaxantina, β-criptoxantina, α-caroteno, luteína, licopeno, zeaxantina, anteraxantina, criptoxantina, fitoeno), cumarinas (aurapteno, transferrina, limetina, isomeranzina, umbeliferona, herniarina, psoraleno, bergamotina), glucaratos, antocianinas y ácidos fenólicos (Rao *et al*., 2021; Okla *et al*., 2019; Sohi y Shri, 2018).

El orégano de castilla es una especie muy valorada en la medicina tradicional, en sus hojas el contenido químico es diverso incluyendo hasta 76 compuestos volátiles (carvacrol, geraniol, timol, linalol, limoneno, pineno) y 30 no volátiles (ácido rosmarínico, ácido caféico, crisoeriol, cirsimaritina, entre otros), muchos de ellos biológicamente activos y, por lo tanto, de interés farmacológico (Arumugam *et al.*, 2016). El orégano común (*Lippia origanoides*), aunque es más usado en la alimentación también es de importancia tradicional. Esta especie tiene variedades químicas dependiendo del constituyente presente en mayor cantidad, siendo los quimiotipos timol y carvacrol los más apreciados por sus propiedades terapéuticas (Parolin Trindade *et al*., 2026).

Como las formulaciones son mezclas de varias plantas e ingredientes, como la miel y la sal, el contenido químico de cada una de ellas también se mezcla. Estas diferentes combinaciones, junto con el método de preparación empleado por cada médico tradicional, hace que los los componentes de los perfiles fitoquímicos obtenidos por TLC y HPTLC muestren diferentes patrones de elución por lo que los perfiles cromatográficos

obtenidos pueden usarse como el fingerprint inicial de las formulaciones.

Conclusiones

La MT hace uso de una gran variedad de plantas medicinales para la elaboración de formulaciones, en su mayoría las plantas se usan en combinaciones particulares según el conocimiento de cada Médico Tradicional, esto deriva en un complejo contenido químico que, junto con el método de preparación, son los responsables de las propiedades terapéuticas atribuidas a los remedios herbolarios. Las formulaciones analizadas mostraron actividad antioxidante y actividad inhibitoria frente a proteínas virales y microorganismos patógenos, lo que en un inicio sugiere que pueden ser consideradas como tratamientos potenciales para enfermedades menores como la gripa, el resfriado y la tos. Además, al respaldar la utilidad terapéutica de las plantas empleadas en la elaboración de estas formulaciones, se puede despertar el interés en la población para considerarlas como especies de traspatio o incluso como opciones para reforestación en zonas urbanas, contribuyendo así a su conservación.

Literatura citada

Almayda, N., Arraihan, N. P., Alfira, D., Masruri, M., Susanti, E., Safitri, A. (2025). Phytochemical compositions, microencapsulation, and antioxidant activity of aqueous extract from *Tithonia diversifolia* leaves. *Trends in Sciences, 22*(9), 10306.

Arumugam, G., Swamy, M. K., Sinniah, U. R. (2016). *Plectranthus amboinicus* (Lour.) Spreng: Botanical, phytochemical, pharmacological and nutritional significance. *Molecules*, *21*(4), 369. https://doi.org/10.3390/molecules21040369

Başaran, N., Paslı, D., Başaran, A. A. (2022). Unpredictable adverse effects of herbal products. *Food and Chemical Toxicology*, *159*, 112762. https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112762

Braz, R., Wolf, L. G., Lopes, G. C., de Mello, J. C. P. (2012). Quality control and TLC profile data on selected plant species commonly found in the Brazilian market. *Revista Brasileira de Farmacognosia, 22*(5), 1111–1118. https://doi.org/10.1590/S0102-695X2011005000204

Brodowska, K. M. (2017). Natural flavonoids: Classification, potential role, and application of flavonoid analogues. *European Journal of Biological Research*, *7*(2), 108–123. http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.545778

Do, M. H., Li, H., Cho, S. Y., Oh, S., Jeong, J. H., Song, M.-S., Jeong, J.-M. (2023). Animal efficacy study of a plant extract complex (BEN815) as a potential treatment for COVID-19.

PLOS ONE, *18*(9), e0289497. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289497

Drašar, P., & Moravcova, J. (2004). Recent advances in analysis of Chinese medical plants and traditional medicines. *Journal of Chromatography B, 812*(1–2), 3–21. https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2004.09.037

Durán-García, R., & Méndez-González, M. (2015). Medicina tradicional y las plantas medicinales en el contexto actual. *Desde el Herbario CICY, 7*, 165–168.

Hassanein, E. H. M., Althagafy, H. S., Baraka, M. A., y El-Khodary, N. M. (2025). Hepatoprotective effects of diosmin: A narrative review. *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology*, *398*, 279–295. https://doi.org/10.1007/s00210-024-03297-z

Hirose-López, J. (2018). La medicina tradicional maya: ¿Un saber en extinción? *Trace (México, DF)*, *74*, 114–134.

Juma, I. (2025). A review on avocado (*Persea americana* Mill.) leaf: Morphology, nutritional and phytochemical profiles, functional properties, health benefits, and toxicity. *Genetic Resources and Crop Evolution, 72*, 9087–9103. https://doi.org/10.1007/s10722-025-02488-8

Kowalska, T., & Sajewicz, M. (2022). Thin-layer chromatography (TLC) in the screening of botanicals–Its versatile potential and selected applications. *Molecules, 27*(19), 6607. https://doi.org/10.3390/molecules27196607

Łata, E., Fulczyk, A., Ott, P. G., Kowalska, T., Sajewicz, M., Móricz, Á. M. (2020). Thin-layer chromatographic quantification of magnolol and honokiol in dietary supplements and selected biological properties of these preparations. *Journal of Chromatography A, 1625*, 461230. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.461230

Lee, E. L., Richards, N., Harrison, J., Barnes, J. (2022). Prevalence of use of traditional, complementary and alternative medicine by the general population: A systematic review of national studies published from 2010 to 2019. *Drug Safety, 45*, 713–735. https://doi.org/10.1007/s40264-022-01189-w

Li, X., & Tian, T. (2018). Phytochemical characterization of *Mentha spicata* L. under differential dried-conditions and associated nephrotoxicity screening of main compound with organ-on-a-chip. *Frontiers in Pharmacology, 9*, 1067. https://doi.org/10.3389/fphar.2018.01067

Méndez, M., & Durán, R. (1997). Diagnóstico del conocimiento etnobotánico actual de las plantas medicinales de la Península de Yucatán. *Boletín de la Sociedad Botánica de México, 60*, 15–24.

Mirzaeian, R., Sadoughi, F., Tahmasebian, S., Mojahedi, M. (2019). Progresses and challenges in the traditional medicine information system: A systematic review [Avances y desafíos en el sistema de información de medicina tradicional: una revisión sistemática]. *Journal of Pharmacy & Pharmacognosy Research, 7*(4), 246–259. http://jppres.com/jppres

Monteiro, M. L. G., Mársico, E. T., Lázaro, C. A., Conte-Junior, C. A. (2016). Thin-layer chromatography applied to foods of animal origin: A tutorial review. *Journal of Analytical Chemistry, 71*, 459–470. https://doi.org/10.1134/S1061934816050075

Ng, J. Y., Verhoeff, N., Steen, J. (2023). What are the ways in which social media is used in the context of complementary and alternative medicine in the health and medical scholarly literature? A scoping review. *BMC Complementary Medicine and Therapies, 23*, 32. https://doi.org/10.1186/s12906-023-03856-6

Okla, M. K., Alamri, S. A., Salem, M. Z. M., Ali, H. M., Behiry, S. I., Nasser, R. A., Alaraidh, I. A., Al-Ghtani, S. M., Soufan, W. (2019). Yield, phytochemical constituents, and antibacterial activity of essential oils from the leaves/twigs, branches, branch wood, and branch bark of sour orange (*Citrus aurantium* L.). *Processes, 7*(6), 363. https://doi.org/10.3390/pr7060363

Parolin Trindade, G., Perez Pinheiro, G., Silva, A. A. R., Porcari, A. de M., Sawaya, A. C. H. F. (2026). Sources of variation of the chemical composition of *Lippia origanoides* Kunth (Verbenaceae). *Natural Product Research, 40*(9), 2306–2315. https://doi.org/10.1080/14786419.2025.2463119

Priyandoko, D., Widowati, W., Novianto, A., Kusuma, H. S. W., Yuninda, V. A., Rizal, R. (2024). Guava (*Psidium guajava* L.) extract inhibits cytokine storm in acute respiratory distress syndrome rats model. *Journal of Research in Pharmacy, 28*(1), 269–277. https://doi.org/10.29228/jrp.694

Priyandoko, D., Widowati, W., Kusuma, H. S. W., Afifah, E., Wijayanti, C. R., Rizal, R., Sholihah, I. A., Permatasari, G. W., Ramadhani, A., Utomo, D. H. (2023). Inflammation inhibitory activity of green tea, soybean, and guava extracts during SARS-CoV-2 infection through TNF protein in cytokine storm. *Computational Biology and Chemistry, 105*, 107898. https://doi.org/10.1016/j.compbiolchem.2023.107898

Pyrzynska, K. (2022). Hesperidin: A review on extraction methods, stability and biological activities. *Nutrients*, *14*(12), 2387. https://doi.org/10.3390/nu14122387

Rao, M. J., Wu, S., Duan, M., Wang, L. (2021). Antioxidant metabolites in primitive, wild, and cultivated *Citrus* and their role in stress tolerance. *Molecules*, *26*(19), 5801. https://doi.org/10.3390/molecules26195801

Refaat, J., Desoukey, S. Y., Ramadan, M. A., Kamel, M. S. (2015). Rhoifolin: A review of sources and biological activities. *International Journal of Pharmacognosy (IJP)*, *2*(3), 102–109. https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.IJP.2(3).102-09

Roopa, M. S., Shubharani, R., Rhetso, T., Sivaram, V. (2020). Comparative analysis of phytochemical constituents, free radical scavenging activity and GC-MS analysis of leaf and flower extract of *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, *11*(10), 5081–5090.

Roys, R. L. (1931). *The ethnobotany of the Maya* (2nd ed.). The Department of Middle American Research, Tulane University of Louisiana.

Seetharaman, M., Krishnan, G., Schneider, R. H. (2021). The future of medicine: Frontiers in integrative health and medicine. *Medicina*, *57*(12), 1303. https://doi.org/10.3390/medicina57121303

Shin, J. A., Oh, S., Jeong, J. M. (2021). The potential of BEN815 as an anti-inflammatory, antiviral, and antioxidant agent for the treatment of COVID-19. *Phytomedicine Plus*, *1*(4), 100058. https://doi.org/10.1016/j.phyplu.2021.100058

Sohi, S., & Shri, R. (2018). Neuropharmacological potential of the genus *Citrus*: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *7*(2), 1538–1548.

Sopjani, M., Falco, F., Impellitteri, F., Guarrasi, V., Nguyen Thi, X., Dërmaku-Sopjani, M., Faggio, C. (2024). Flavonoids derived from medicinal plants as a COVID-19 treatment. *Phytotherapy Research*, *38*(3), 1589–1609. https://doi.org/10.3390/nu14122387

Yasir, M., Das, S., Kharya, M. D. (2010). The phytochemical and pharmacological profile of *Persea americana* Mill. *Pharmacognosy Reviews*, *4*(7), 77–84. https://doi.org/10.4103/0973-7847.65332

Yuan, H., Ma, Q., Ye, L., Piao, G. (2016). The traditional medicine and modern medicine from natural products. *Molecules, 21*, 559. https://doi.org/10.3390/molecules21050559

TEMÁTICA 8. SUELOS, SISTEMAS AGROFORESTERALES Y SILVICULTURA

Aprovechamiento de sistemas agroforestales como estrategia de diversificación productiva en Tlaxco, Tlaxcala

Nidia Sarahí Reséndiz Flores[23], Maricela Hernández Vázquez, Silvia Herrera Cortés, Minerva Morales Flores

Resumen

El presente estudio analiza el potencial de los sistemas agroforestales en el municipio de Tlaxco, Tlaxcala, bajo un enfoque agroecológico y de desarrollo territorial. La investigación parte de la necesidad de fortalecer alternativas productivas capaces de diversificar los ingresos rurales, mejorar el aprovechamiento de los recursos naturales y responder a los desafíos asociados con la variabilidad climática, la degradación del suelo y la transformación de las prácticas agrícolas tradicionales. El objetivo es identificar especies vegetales aptas para su incorporación en los sistemas productivos, evaluar sus beneficios ambientales, económicos y socioculturales, y proponer pautas de aplicación que consideren cambios técnicos, institucionales y culturales. El metepantle resulta especialmente relevante como referencia regional, ya que integra terrazas con cultivos de maíz, agave, frijol y calabaza, además de plantas silvestres de utilidad alimentaria, medicinal y ecológica. Este sistema representa un conocimiento campesino adaptado a las condiciones territoriales de Tlaxcala y constituye una alternativa para fortalecer la agrobiodiversidad y el manejo sostenible del paisaje.

Palabras clave: sistemas productivos, beneficios ambientales, económicos y socioculturales.

Abstract

This study analyzes the potential of agroforestry systems in the municipality of Tlaxco, Tlaxcala, using an agroecological and territorial development approach. The research stems from the need to strengthen productive alternatives capable of diversifying rural incomes, improving natural resource utilization, and addressing challenges associated with climate variability, soil degradation, and the transformation of traditional agricultural practices. The objective is to identify plant species suitable for integration into production systems, evaluate their environmental, economic, and sociocultural benefits, and propose implementation guidelines that take into account technical, institutional, and cultural changes. The

[23] Universidad Autónoma Tlaxcala. Facultad de Agrobiología. Calle Benito Juárez No.5, Tlaxco, Tlaxcala. C.P. 90250. *autor de correspondencia: nisaref@gmail.com, mhernandezv@uatx.mx, minerva.flores.m@uatx.mx, silvia.herrera@uatx.mx

metepantle is particularly relevant as a regional reference, as it integrates terraces with crops such as maize, agave, beans, and squash, alongside wild plants of nutritional, medicinal, and ecological value. This system embodies traditional farming knowledge adapted to Tlaxcala's territorial conditions and offers an alternative for strengthening agrobiodiversity and sustainable landscape management.

Keywords: production systems, environmental, economic, and sociocultural benefits.

Introducción

Los sistemas agroforestales son fundamentales para equilibrar la agricultura, el cuidado ambiental y la economía rural en zonas montañosas como Tlaxco, Tlaxcala. Estas prácticas combinan árboles o arbustos con cultivos y ganadería en un mismo terreno. Gracias a esta integración, mitigan el cambio climático, frenan el deterioro del suelo y fortalecen la producción frente a los modelos tradicionales.

En el municipio montañoso de Tlaxco, Tlaxcala, la economía depende de la agricultura de temporal en terrenos inclinados. Este modelo tradicional sufre por la pérdida de suelo, la escasez de agua y la falta de variedad en los cultivos. Para resolverlo, los sistemas agroforestales surgen como una opción sustentable que fortalece los hogares rurales. Al combinar árboles maderables locales con frutales, maguey, nopal y ganado, se crean nuevas fuentes de dinero y alimento. Casos exitosos en el estado, como la comunidad de Vicente Guerrero en Españita, prueban que esta diversificación nutre a familias enteras y protege el ecosistema mediante la captura de carbono y la retención de suelo. Sin embargo, para replicar este éxito en Tlaxco, es indispensable adecuar el modelo a las condiciones climáticas, sociales y culturales de sus propios productores (SADER, 2022).

Tlaxco posee ventajas clave para implementar la agroforestería, como su vocación forestal avalada por CONAFOR, ejidos organizados, mercados cercanos y saberes tradicionales en el manejo de terrazas y jagüeyes. No obstante, el sector enfrenta retos graves: falta de relevo generacional por el envejecimiento de los agricultores, escasez de agua, nula asistencia técnica y falta de políticas públicas específicas. Por ello, este estudio analiza el potencial de los sistemas agroforestales en el municipio bajo un enfoque agroecológico y de desarrollo territorial. La investigación busca identificar especies aptas, evaluar beneficios y proponer pautas de aplicación que consideren cambios técnicos, institucionales y culturales. Su valor radica en aportar soluciones al cambio climático en zonas de montaña, conservar el sistema tradicional del metepantle y ofrecer guías estratégicas para tomadores de decisiones que buscan la seguridad alimentaria y la equidad rural (FAO, 2025).

Por lo tanto, la adopción de sistemas agroforestales en el municipio de Tlaxco, Tlaxcala, se presenta como una estrategia indispensable y viable para superar las limitaciones de la agricultura tradicional de ladera, caracterizada por la erosión y la baja diversidad productiva (Krzyzanowski, 2022). A pesar de enfrentar desafíos estructurales críticos, como el envejecimiento del campo y la falta de apoyo institucional, el municipio posee fortalezas únicas: una sólida vocación forestal, organización ejidal y un valioso conocimiento ancestral en el manejo del suelo y el agua. Al integrar componentes maderables, frutales, ganado y cultivos clave como el maguey y el nopal, este modelo no solo promete diversificar los ingresos y garantizar la seguridad alimentaria local siguiendo ejemplos exitosos como el de Españita, sino también restaurar el entorno ecológico (Guzmán *et. al*., 2022) Bajo un enfoque agroecológico y de desarrollo territorial, esta investigación demuestra que la transición hacia la sostenibilidad en zonas de montaña requiere adaptar las innovaciones técnicas a la realidad cultural de los productores, transformando la agroforestería en un pilar de resiliencia climática, equidad rural y conservación del patrimonio biocultural de la región (Winowiecki *et. al*., 2026).

Materiales y métodos

Ubicación. Tlaxco es una ciudad mexicana, cabecera y localidad más poblada del municipio del mismo nombre, ubicada al norte del estado de Tlaxcala. De acuerdo con el censo de población y vivienda de 2020 realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Se ubica en las siguientes coordenadas: entre 19° 30’ – 19° 44’ latitud norte y 97° 57’ – 98° 23’ longitud oeste. (topographic-map)

La ciudad está alrededor de 2,540 msnm; el municipio oscila entre 2,500 y 3,500 msnm.atlas.tlaxcala.gob+1. La superficie municipal: 577.189 km², lo que lo convierte en el municipio más extenso de Tlaxcala (≈13.71% del territorio estatal).(mx.topographic-map) Limita al Norte: estados de Puebla e Hidalgo, al sur: Atlangatepec y Tetla, al Oriente: Lázaro Cárdenas y al Poniente: Benito Juárez y Hueyotlipan. Cuenta con una población total de 45, 438 habitantes. Una superficie sembrada que ronda las 6,519 hectáreas en ciclos agrícolas recientes, destacando como uno de los municipios con mayor actividad y superficie agrícola de temporal en todo el estado. Es el segundo municipio más importante en producción e importancia por superficie dedicada a la agricultura en la entidad. Predomina fuertemente el cultivo de temporal. Los cultivos principales: Maíz grano, trigo grano, cebada grano, avena forrajera y alfalfa. (gobierno de México, 2022) (ver figura 1).

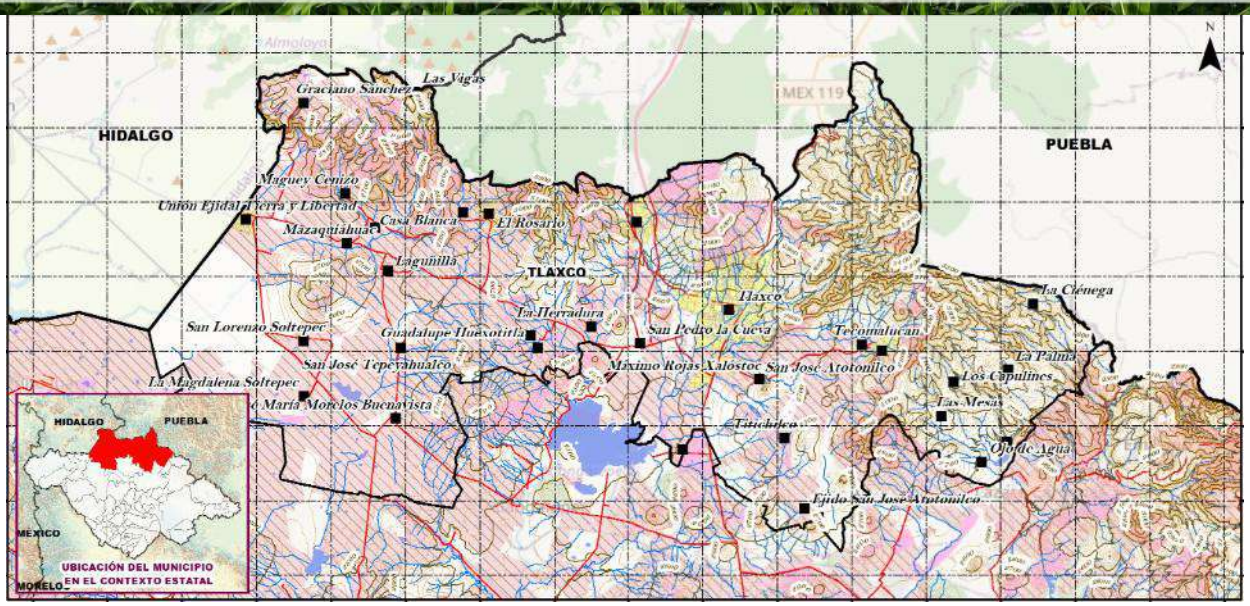


Figura 1. Mapa referencia y de ubicación del municipio de Tlaxco. Tlaxcala.

Fuente: web Atlas, Tlaxcala.

El estudio empleo un marco referencial y datos gubernamentales, se basa en un enfoque mixto cualitativo, descriptivo y territorial. Primeramente, se realizó una revisión de literatura científica, documentos técnicos, planes municipales y programas institucionales; recopilando información climática, edafológica, topográfica, hidrológica y de uso del suelo. Posteriormente de acuerdo a la zonificación, se identificación y se seleccionaron especies para propuestas de diseños de sistemas agroforestales y por último se evaluaron las alternativas agroforestales según criterios de viabilidad ecológica, técnica, económica, social e institucional, con el propósito de formular pautas de implementación, seguimiento y manejo adaptativo (Rojas, Beltrán y Zafra., 2022). (Gassner y Dobie, 2023).

Resultados y discusión

La variabilidad climática es un factor importante para el establecimiento de sistemas Agroforestales. En Tlaxcala, la temporada de lluvia es nublada, la temporada seca es parcialmente nublada y es cómodo durante todo el año. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 5 °C a 25 °C y rara vez baja a menos de 2 °C o sube a más de 28 °C.

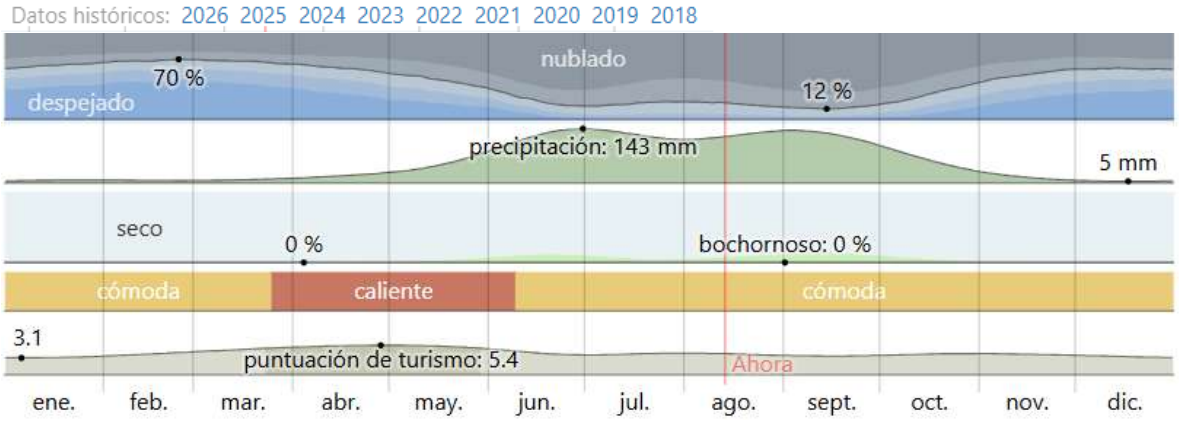


Figura 2. El clima en Tlaxcala por mes

El mes más cálido es mayo, con una temperatura máxima promedio de 25 °C, y el mes más frío es enero, con una temperatura mínima promedio de 5 °C. El cielo está más despejado en febrero y más nublado en septiembre. El mes con más precipitación es septiembre, con un promedio de 130 mm, y el mes con menos precipitación es diciembre, con un promedio de 5 mm. Las condiciones bochornosas son poco frecuentes durante todo el año. La mejor época del año para actividades de clima templado es desde finales de marzo hasta finales de mayo. La temporada templada dura 2,4 meses, del 26 de marzo al 7 de junio, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 24 °C. El mes más cálido del año en Tlaxcala es mayo, con una temperatura máxima promedio de 25 °C y mínima de 11 °C.

La temporada fresca dura 2.2 meses, del 30 de noviembre al 4 de febrero, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 21 °C. El mes más frío del año en Tlaxcala es enero, con una temperatura mínima promedio de 5 °C y máxima de 20 °C. Un día mojado es un día con por lo menos 1 milímetro de líquido o precipitación equivalente a líquido. La probabilidad de días mojados en Tlaxcala varía muy considerablemente durante el año.

La temporada más mojada dura 4.7 meses, de 22 de mayo a 12 de octubre, con una probabilidad de más del 40 % de que cierto día será un día mojado. El mes con más días mojados en Tlaxcala es julio, con un promedio de 22.4 días con por lo menos 1 milímetro de precipitación.

La temporada más seca dura 7.3 meses, del 12 de octubre al 22 de mayo. El mes con menos días mojados en Tlaxcala es diciembre, con un promedio de 1.3 días con por lo menos 1 milímetro de precipitación.

Entre los días mojados, distinguimos entre los que tienen solamente lluvia, solamente nieve o una combinación de las dos. El mes con más días con solo lluvia en Tlaxcala es julio, con un promedio de 22.4 días. En base a esta categorización, el tipo más común de precipitación durante el año es solo lluvia, con una probabilidad máxima del 77 % el 3 de julio.

La temporada de lluvia dura 7.6 meses, del 1 de abril al 19 de noviembre, con un intervalo móvil de 31 días de lluvia de por lo menos 13 milímetros. El mes con más lluvia en Tlaxcala es septiembre, con un promedio de 130 milímetros de lluvia.

El periodo del año sin lluvia dura 4.4 meses, del 19 de noviembre al 1 de abril. El mes con menos lluvia en Tlaxcala es diciembre, con un promedio de 5 milímetros de lluvia.

El área en un radio de 3 kilómetros de Tlaxcala está cubierta de tierra de cultivo (53 %) y superficies artificiales (44 %), en un radio de 16 kilómetros de tierra de cultivo (62 %) y arbustos (23 %) y en un radio de 80 kilómetros de tierra de cultivo (44 %) y árboles (20 %).

Derivado del anterior análisis climático, el aprovechamiento de los sistemas agroforestales en Tlaxco, Tlaxcala, se plantea como una estrategia para integrar producción agrícola, manejo forestal, conservación del suelo y diversificación de ingresos. El municipio posee potencial forestal y forma parte de las zonas prioritarias señaladas para impulsar el manejo sustentable en ejidos y comunidades de Tlaxcala. (Weather Spark, 2026).

Los resultados demuestran que los "árboles en terrenos de cultivo", el metepantle y sistemas agrosilvopastoriles, considerando las condiciones de temporal, la pendiente, la disponibilidad de agua y las prácticas campesinas locales.

El metepantle resulta especialmente relevante como referencia regional, porque integra terrazas con maíz, agave, frijol, calabaza y plantas silvestres. La FAO lo reconoce como un sistema agrícola ancestral de Tlaxcala, asociado con la conservación de semillas, la biodiversidad, la seguridad alimentaria y la resiliencia climática (FAO, 2025).

Cuadro 1. Alternativas de aprovechamiento

Sistema	Componentes posibles	Productos y servicios
Árboles en terrenos de cultivo	Maíz, frijol, haba, calabaza, frutales y árboles nativos	Alimentos, fruta, leña, forraje, materia orgánica y protección contra erosión

Sistema	Componentes posibles	Productos y servicios
Metepantle o agricultura en terrazas	Maguey, maíz, frijol, calabaza, plantas silvestres y árboles frutales	Conservación de suelo y agua, producción alimentaria, agave, biodiversidad y patrimonio biocultural
Agrosilvopastoril	Pastos, árboles forrajeros, ganado menor y cultivos	Carne, leche, estiércol, forraje, sombra y diversificación económica
Manejo de bordes y barreras vivas	Maguey, nopal, frutales, arbustos y especies nativas	Control de escurrimientos, delimitación de parcelas, alimento, forraje y hábitat
Sistemas forestales productivos	Pino, encino y otras especies adaptadas, combinados con productos no maderables	Madera regulada, semillas, hongos, plantas medicinales, servicios ambientales y restauración

Los beneficios potenciales para Tlaxco

- Reducir la erosión hídrica y eólica mediante terrazas, bordos, barreras vivas y cobertura permanente del suelo.
- Mejorar la infiltración y retención de humedad en parcelas de temporal.
- Diversificar la producción mediante granos, frutales, maguey, nopal, forraje, miel y productos forestales no maderables.
- Disminuir la dependencia de un solo cultivo o fuente de ingreso.
- Incrementar la materia orgánica del suelo mediante hojarasca, podas, residuos de cosecha y estiércol.
- Conservar especies nativas y favorecer polinizadores, aves y otros organismos benéficos.
- Fortalecer la seguridad alimentaria y la transmisión de conocimientos campesinos.
- Generar oportunidades para turismo rural, transformación agroalimentaria y comercialización local.

La experiencia documentada en Vicente Guerrero, municipio de Españita, demuestra que un

sistema de una hectárea con cultivos anuales, frutales, animales, terrazas y bordos puede contribuir tanto a la producción alimentaria como a la conservación del suelo. Sin embargo, sus resultados no deben extrapolarse directamente a Tlaxco: es necesario realizar una evaluación específica de las condiciones ambientales, económicas y sociales del municipio.

Este estudio representa una oportunidad para Tlaxco, debido a que existe una posibilidad vinculada con el manejo y la conservación de germoplasma forestal de 23 hectáreas para pino colorado (Pinus patula), destinada a obtener semilla adaptada y apoyar programas de reforestación.

Esta iniciativa puede vincularse con sistemas agroforestales mediante:

- Producción de plantas nativas para establecer cercos vivos y corredores biológicos.
- Restauración de laderas y zonas de recarga hídrica.
- Integración de árboles en parcelas agrícolas sin sustituir completamente la superficie de cultivo.
- Aprovechamiento de podas, frutos, semillas y otros productos no maderables.
- Participación organizada de ejidos en viveros, cadenas de valor y servicios ambientales.

Debe distinguirse entre manejo forestal y agroforestería: una plantación o bosque manejado no constituye automáticamente un sistema agroforestal. Para ser agroforestal debe existir una interacción intencional entre componentes leñosos, agrícolas o pecuarios en la misma unidad de manejo.

Conclusiones

Los esfuerzos orientados a promover la agroforestería y la diversificación agrícola en Tlaxcala forman parte del enfoque más amplio de la diversificación productiva.

Esta perspectiva destaca la importancia de garantizar que los pequeños productores tengan acceso a la tierra, las semillas y el agua, considerados recursos fundamentales para fortalecer los sistemas alimentarios locales y favorecer una gestión ambiental responsable. En este contexto, las prácticas agroecológicas como la combinación de distintos cultivos, la siembra intercalada para prevenir la degradación del suelo y la incorporación de los saberes locales adquieren especial relevancia.

En Tlaxco, los sistemas agroforestales se diseñan considerando las condiciones climáticas y edáficas locales, priorizando arreglos que favorezcan la biodiversidad. Esta estrategia

responde a la premisa de que servicios ecosistémicos clave como la polinización y la conservación de la salud del suelo se potencian mediante una mayor diversidad de variedades de cultivos y especies vegetales.

Aunque continúan los debates empíricos sobre la relación entre biodiversidad y productividad, el cuerpo de evidencia disponible indica que los sistemas agrícolas diversificados pueden proporcionar rendimientos estables o incluso superiores, junto con servicios ecosistémicos, en condiciones reales. Esto ocurre especialmente cuando existen garantías de tenencia de la tierra, acceso a germoplasma diverso y una integración efectiva de los saberes de las comunidades locales. La integración de estas perspectivas conduce a una interpretación más matizada: en Tlaxcala, los sistemas agroforestales bien diseñados pueden alcanzar una mayor eficiencia a largo plazo al equilibrar las metas inmediatas de producción con la conservación del suelo.

La alternativa más sólida para Tlaxco no sería promover únicamente la extracción de madera, sino desarrollar sistemas diversificados que combinen:

maíz y leguminosas + maguey y frutales + árboles nativos + conservación de suelo + aprovechamiento pecuario o apícola.

Este enfoque permitiría convertir los sistemas agroforestales en una estrategia de desarrollo rural, conservación ambiental y resiliencia climática, siempre que se diseñe con participación de ejidatarios, productores, autoridades municipales, instituciones académicas y organizaciones locales.

Literatura citada

Producción agropecuaria y pesquera de Tlaxcala. Secretaria de Agricultura y Desarrollo rural . 24 de Mayo de 2022. https://www.google.com/search?q=cual+es+la+superficie+agricola+de+tlaxco+tlaxcala&oq=cual+es+la+superfice+agricola+de+tlaxco+&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUqBwgBECEYnwUyBggAEEUYOTIHCAEQIRifBTIHCAIQIRifBTIHCAMQIRifBTIHCAQQIRifBdIBCjExMzcxajBqMTWoAgiwAgHxBdjJ_9THv5g08QXYyf_Ux7YNA&sourceid=chrome&source=chrome.rb&ie=UTF-8 consultado el 12 de Julio 2026.

Weather Spark https://es.weatherspark.com/y/6724/Clima-promedio-en-Tlaxcala-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-ColorTemperature consultado el 13 de Julio 2026.

Venn R, Montero-de-Oliveira F-E, Buratti-Donham J, Eden J and Reinecke S (2024) Policies for agroforestry, a narrative review of four 'continental' regions: EU, India, Brazil, and the United States. Front. Sustain. Food Syst. 8:1417740. doi: 10.3389/fsufs.2024.1417740

FAO, 2025. Metepantle Ancestral Agricultural System in the Mountainous Zones of Tlaxcala, Mexico. Consultado el 22 de Julio en https://www.fao.org/giahs/giahs-around-the-world/mexico-meteplante/en

Rojas Pardo, M., Beltrán Vargas, J., & Zafra Mejía, C. A. (2022). Tendencias metodológicas para la implementación de sistemas agroforestales en el marco del desarrollo sustentable: una revisión. Madera y Bosques, 28(1), e2812279. https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812279

Moreno-Calles AI, Casas A, Rivero-Romero AD, Romero-Bautista YA, Rangel-Landa S, Fisher-Ortíz RA, Alvarado-Ramos F, Vallejo-Ramos M, Santos-Fita D. Ethnoagroforestry: integration of biocultural diversity for food sovereignty in Mexico. J Ethnobiol Ethnomed. 2016 Nov 23;12(1):54. doi: 10.1186/s13002-016-0127-6. PMID: 27881142; PMCID: PMC5120568.

Krzyzanowski B, Manson S. Regionalization with Self-Organizing Maps for Sharing Higher Resolution Protected Health Information. Ann Am Assoc Geogr. 2022;112(7):1866-1889. doi: 10.1080/24694452.2021.2020617. Epub 2022 Apr 5. PMID: 37152354; PMCID: PMC10162588.

Guzmán Luna A, Bacon CM, Méndez VE, Flores Gómez ME, Anderzén J, Mier y Terán Giménez Cacho M, Hernández Jonapá R, Rivas M, Duarte Canales HA and Benavides González ÁN (2022) Toward Food Sovereignty: Transformative Agroecology and Participatory Action Research With Coffee Smallholder Cooperatives in Mexico and Nicaragua. Front. Sustain. Food Syst. 6:810840. doi: 10.3389/fsufs.2022.810840

Winowiecki L, Bargués-Tobella A, Chevallier R, Linden H, Trautman S, Arinloye Ademonla D, Bayala J, Chacha R, Hannam J, Kimaro A, Mwangi L, Betserai Nyoka I, Ouko L, Pittaki Z, Snapp S, Stewart Z, Takousing B, Vågen T-G and Lal R (2026) Measuring what matters: soil health as the missing metric in climate-smart agriculture monitoring. Front. Sustain. Food Syst. 10:1814366. doi: 10.3389/fsufs.2026.1814366

Gassner A y Dobie P. eds. 2023. Agroforestería: Una Guía. Principios de diseño y manejo agroforestal en beneficio de las personas y del medioambiente. Bogor, Indonesia: Centro para la Investigación Forestal Internacional (CIFOR); y Nairobi: Centro Internacional de Investigación Agroforestal (ICRAF).

Caracterización fisicoquímica del suelo para el monitoreo y manejo de sistemas agroforestales de cacao bajo manejo agroecológico en Cunduacán, Tabasco

Julio César Buendía Espinoza[24], Leslie Montserrat Montero Torres[25], Marina Olivia Franco Hernández[2], Elisa del Carmen Martínez Ochoa[26]

Resumen

Los sistemas agroforestales de cacao dependen de las propiedades del suelo que regulan la disponibilidad de nutrientes y agua. El objetivo fue caracterizar la variabilidad y las relaciones entre las propiedades físicas y químicas del suelo en cuatro cacaotales bajo manejo agroecológico de Cunduacán, Tabasco, utilizando un acahual como referencia local, para identificar los principales patrones edáficos y generar una base para su monitoreo y manejo. Se analizaron cinco muestras compuestas recolectadas a una profundidad de 30 a 40 cm. Se determinaron pH, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico potencial, carbono orgánico, nitrógeno Kjeldahl, formas inorgánicas de nitrógeno, fósforo extraíble, bicarbonato, sulfato, cloruro, capacidad de retención de agua, textura y color. Los datos se examinaron mediante estadística descriptiva. Las relaciones entre carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico potencial, capacidad de retención de agua y arcilla se evaluaron con correlaciones de Pearson y un análisis de componentes principales sobre datos estandarizados. Los cacaotales presentaron pH de 6.43 a 6.53 y diferencias notables en carbono orgánico, aniones, textura y retención de agua. La asociación de mayor magnitud se observó entre arcilla y retención de agua (r=0.839). Los dos primeros componentes explicaron 82.54% de la variabilidad; el CP1 estuvo definido principalmente por la capacidad de retención de agua y el contenido de arcilla, mientras que el CP2 representó principalmente el contraste entre la capacidad de intercambio catiónico potencial y el carbono orgánico. El acahual ocupó una posición intermedia en el plano definido por los dos primeros componentes y no presentó una diferenciación multivariada marcada respecto de los cacaotales. Los resultados evidenciaron heterogeneidad edáfica entre los sitios estudiados y proporcionan una caracterización de referencia para su monitoreo y manejo.

[24] Posgrado en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C.P. 56230, México. jbuendiae@chapingo.mx; al25510229@chapingo.mx
[25] Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional, Av. Acueducto s/n, Barrio La Laguna Ticomán, Ciudad de México, C.P. 07340, México. mfrancoh@ipn.mx
[26] Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C.P. 56230, México. ECMARTINEZO@chapingo.mx

Palabras clave: agroforestería; cacao; manejo agroecológico; propiedades edáficas; análisis multivariado.

Abstract

Cacao agroforestry systems depend on soil properties that regulate nutrient and water availability. The objective was to characterize the variability and relationships among soil physical and chemical properties in four cacao agroforestry systems under agroecological management in Cunduacán, Tabasco, using a secondary-vegetation site as a local reference, to identify the main soil patterns and provide a basis for their monitoring and management. Five composite soil samples were collected at a depth of 30–40 cm. Soil pH, electrical conductivity, potential cation exchange capacity, organic carbon, Kjeldahl nitrogen, inorganic nitrogen forms, extractable phosphorus, bicarbonate, sulfate, chloride, water-holding capacity, texture, and color were determined. Data were examined using descriptive statistics. Relationships among organic carbon, potential cation exchange capacity, water-holding capacity, and clay content were evaluated using Pearson correlations and principal component analysis on standardized data. Cacao agroforestry systems showed pH values ranging from 6.43 to 6.53 and notable differences in organic carbon, anions, texture, and water-holding capacity. The association of greatest magnitude was observed between clay content and water-holding capacity (r = 0.839). The first two principal components explained 82.54% of the total variability; PC1 was mainly defined by water-holding capacity and clay content, whereas PC2 mainly represented the contrast between potential cation exchange capacity and organic carbon. The secondary-vegetation reference site occupied an intermediate position in the space defined by the first two components and did not show marked multivariate differentiation from the cacao agroforestry systems. The results revealed soil heterogeneity among the studied sites and provide a reference characterization for their monitoring and management.

Keywords: agroforestry; cacao; agroecological management; soil properties; multivariate analysis.

Introducción

El suelo sostiene funciones esenciales para los agroecosistemas, como la producción de biomasa, la regulación y el almacenamiento de agua, el ciclado de nutrientes y la regulación de procesos ambientales. Desde una perspectiva funcional, la calidad del suelo se entiende como su capacidad para desempeñar estas funciones dentro de los límites de un ecosistema y un uso de la tierra determinados, sostener la productividad biológica y contribuir al

mantenimiento de la calidad ambiental (Bünemann et al., 2018). Esta capacidad no puede representarse adecuadamente mediante una sola medición, ya que depende de la interacción de atributos físicos, químicos y biológicos que responden de manera distinta al ambiente y al manejo (Doran & Zeiss, 2000).

En los sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.), los árboles acompañantes, el cultivo y el suelo conforman una unidad funcional en la que la hojarasca, las raíces y el reciclaje de nutrientes pueden modificar la materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes y las propiedades hídricas. Sin embargo, los efectos no son uniformes y dependen de la composición del sistema, la intensidad del manejo, la edad de la plantación y las condiciones edáficas iniciales. En la Amazonia peruana, distintos esquemas agroforestales de cacao mostraron trayectorias diferenciadas de pH, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica y propiedades hídricas a lo largo del tiempo (Arévalo-Gardini et al., 2015). En Ghana también se documentaron diferencias en carbono orgánico, humedad, conductividad eléctrica y pH entre sistemas orgánicos y convencionales, además de efectos asociados con la profundidad del suelo (Asigbaase et al., 2021). Estos resultados evidencian la necesidad de caracterizar cada contexto antes de atribuir beneficios generales al manejo agroecológico.

En Tabasco, los sistemas agroforestales de cacao se desarrollan en ambientes cálidos y húmedos con marcada influencia aluvial. Una caracterización realizada en Cunduacán, Cárdenas y Comalcalco encontró suelos predominantemente arcillosos, de reacción moderadamente ácida a neutra y con variación en conductividad eléctrica, materia orgánica y nitrógeno total. El mismo estudio destacó que estas propiedades se encuentran interrelacionadas y condicionan la interpretación de la fertilidad del suelo (Brito-Vega et al., 2018). La región de la Chontalpa, a la que pertenece Cunduacán, se localiza en la Llanura Costera del Golfo de México y se caracteriza por un clima tropical cálido húmedo, relieve plano, zonas inundables y numerosos cuerpos de agua (Chávez-García & Castelán-Estrada, 2019).

Los sistemas agroforestales de cacao en México se desarrollan principalmente a pequeña escala, mediante trabajo familiar y con el cacao asociado a diversas especies que cumplen funciones productivas, alimentarias y ecológicas. A partir de una revisión bibliográfica, Fisher-Ortíz et al. (2022) identificaron la agrobiodiversidad, los saberes campesinos, la innovación científica y la autorregulación socioecológica como factores que pueden favorecer la capacidad adaptativa de estos sistemas, aunque también reconocieron limitaciones económicas y organizativas. En este contexto, la agroecología no se limita a eliminar o sustituir insumos químicos, sino que comprende principios como el reciclaje de recursos, la reducción de insumos externos, la conservación de la biodiversidad, la salud del suelo, las sinergias ecológicas, la participación y la cocreación de conocimientos (Wezel et al., 2020).

Las propiedades físicas y químicas del suelo se miden en distintas unidades y algunas están correlacionadas, lo que puede dificultar su interpretación conjunta y generar información redundante. El análisis de componentes principales (ACP) permite transformar variables correlacionadas en componentes no correlacionados y reconocer cuáles contribuyen en mayor medida a la variabilidad del conjunto. En las evaluaciones de calidad del suelo, este procedimiento se ha utilizado como herramienta multivariada para reducir conjuntos amplios de indicadores y suele complementarse con análisis de correlación para disminuir la redundancia (Bünemann et al., 2018). Como fase exploratoria, el ACP también puede orientar la selección de indicadores en evaluaciones de calidad del suelo. Bahena-Osorio et al. (2023) combinaron análisis multivariado y correlaciones para identificar un conjunto mínimo de indicadores en suelos afectados por estrés abiótico. La selección debe entenderse como específica del sitio y del objetivo, y no como una lista universal aplicable sin validación. En este contexto, esta contribución considera exclusivamente las propiedades físicas y químicas del suelo determinadas en cuatro cacaotales agroforestales bajo manejo agroecológico y en un acahual sin manejo agrícola actual, incorporado como sitio de referencia local.

Por lo anterior, el objetivo fue caracterizar la variabilidad y las relaciones entre las propiedades físicas y químicas del suelo en cuatro sistemas agroforestales de cacao bajo manejo agroecológico de Cunduacán, Tabasco, utilizando un acahual como referencia local, para identificar los principales patrones edáficos y generar una base para su monitoreo y manejo.

Se planteó como hipótesis de investigación que la variabilidad edáfica estaría estructurada por las asociaciones entre las dimensiones orgánica, química, hídrica y textural representadas por las variables seleccionadas, generando patrones fisicoquímicos diferenciados entre los sitios estudiados.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio observacional se realizó en cuatro cacaotales agroforestales bajo manejo agroecológico y en un acahual utilizado como sitio de referencia local. Los sitios se ubicaron en las localidades La Piedra 1.ª, 2.ª y 3.ª Sección, pertenecientes al Centro Integrador La Piedra, en el municipio de Cunduacán, Tabasco, México (Figura 1). El acahual correspondió a un área de vegetación secundaria sin manejo agrícola activo al momento del muestreo y se incorporó para contextualizar la condición edáfica de los cacaotales.

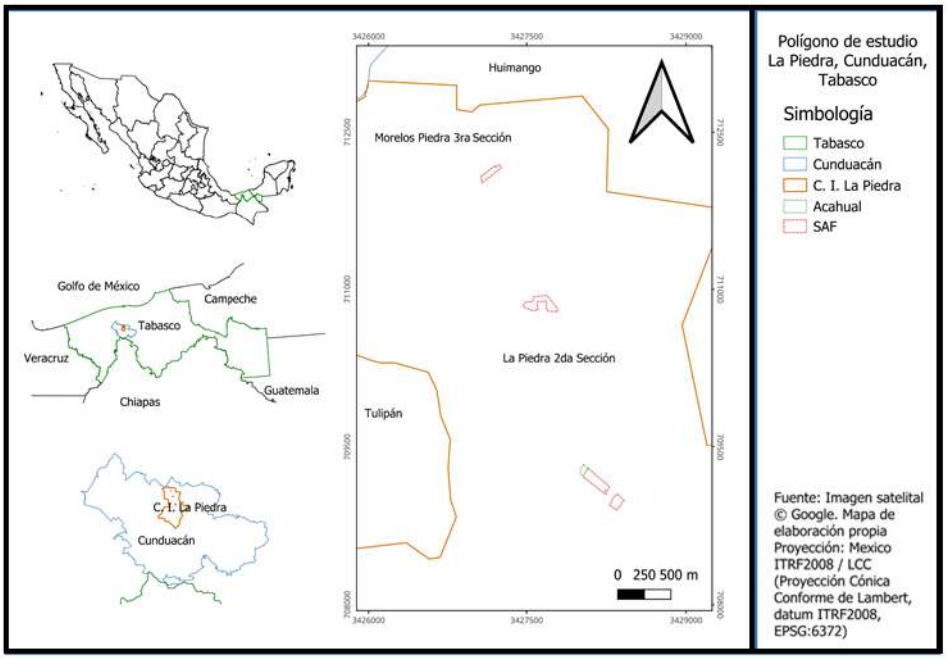


Figura 1. Localización de los cuatro sistemas agroforestales de cacao bajo manejo agroecológico y del acahual de referencia en el Centro Integrador La Piedra, Cunduacán, Tabasco, México. **Fuente:** elaboración propia con datos cartográficos de INEGI e imagen satelital de Google Satellite (2026).

Cunduacán se localiza en la subregión Chontalpa, dentro de la provincia fisiográfica Llanura Costera del Golfo Sur y de la subprovincia Llanuras y Pantanos Tabasqueños. El municipio presenta un relieve predominantemente plano, formado principalmente por llanuras aluviales y áreas sujetas a inundación. El clima es cálido húmedo, con una temperatura media anual de 26 a 28 °C y una precipitación anual de 1500 a 2500 mm (INEGI, 2010). Estas condiciones, junto con el predominio de materiales aluviales y palustres, caracterizan el entorno donde se desarrollan los sistemas agroforestales de cacao. Cunduacán forma parte de la región cacaotera de la Chontalpa, en la que el cacao se cultiva tradicionalmente bajo sistemas agroforestales con árboles de sombra (Brito-Vega et al., 2018).

Diseño y unidades de estudio

Se realizó un estudio de campo observacional, de corte transversal y con alcance descriptivo-exploratorio. Se incluyeron cuatro cacaotales agroforestales bajo manejo agroecológico y un

acahual utilizado como sitio de referencia local. Los cacaotales se seleccionaron mediante un muestreo no probabilístico intencional, con base en los siguientes criterios: ubicación dentro del Centro Integrador La Piedra, presencia comprobada de un sistema agroforestal de cacao, aplicación de prácticas compatibles con el manejo agroecológico, accesibilidad para realizar el muestreo y autorización de la persona responsable de la parcela. La clasificación del manejo se sustentó en la información proporcionada por las personas productoras y en las observaciones realizadas durante los recorridos de campo. La denominación de manejo agroecológico se utilizó para identificar sistemas en los que se reportaron y observaron prácticas compatibles con principios agroecológicos, como el reciclaje de recursos, la reducción de insumos externos, la conservación de la biodiversidad, el mantenimiento de la salud del suelo y el favorecimiento de sinergias ecológicas (Wezel et al., 2020), sin que esta denominación implique una certificación o una evaluación cuantitativa del grado de transición agroecológica de las parcelas.

El acahual se seleccionó por su cercanía con los cacaotales, su pertenencia al mismo contexto ambiental y la ausencia de manejo agrícola activo al momento del muestreo. Se utilizó como referencia local para contextualizar las propiedades del suelo de los cacaotales y no como un control experimental. Debido a que se dispuso de un solo acahual, sus valores se utilizaron exclusivamente como referencia descriptiva y no para realizar inferencias sobre diferencias atribuibles al tipo de manejo.

Cada cacaotal y el acahual se consideraron unidades de estudio y de análisis. Dentro de cada unidad, las submuestras de suelo recolectadas mediante un recorrido en zigzag, a una profundidad de 30 a 40 cm, se mezclaron y homogeneizaron para formar una muestra compuesta. En total se obtuvieron cinco muestras compuestas: cuatro correspondientes a los cacaotales y una al acahual. Las submuestras de campo y las repeticiones realizadas durante las determinaciones de laboratorio no se consideraron réplicas estadísticas independientes. Debido al carácter observacional del estudio y a que solamente se incluyó un acahual, los contrastes con este sitio se interpretaron de manera descriptiva y exploratoria.

Muestreo y preparación de las muestras

El muestreo de suelo se realizó durante una sola campaña de campo en el mes de junio de 2026. El número de puntos de muestreo se calculó de acuerdo con la superficie de cada sitio mediante la ecuación $N = (3-5)\sqrt{A}$, donde (N) representa el intervalo recomendado de muestras simples y (A) corresponde al área expresada en hectáreas (Lizcano Toledo et al., 2017). Para determinar el número de puntos se utilizó el límite inferior del intervalo y el resultado se redondeó al número entero inmediato superior.

El cálculo dio como resultado cuatro puntos de muestreo en el cacaotal SAF1, cinco en SAF2, tres en SAF3 y cinco en SAF4. También se establecieron dos puntos en el Acahual utilizado como referencia local. En total se recolectaron 19 muestras simples, 17 procedentes de los cuatro cacaotales bajo manejo agroecológico y 2 del acahual. Los puntos se distribuyeron mediante recorridos en zigzag con el propósito de representar la variabilidad espacial dentro de cada sitio en la conformación de las muestras compuestas.

En cada punto se retiraron la hojarasca y los residuos vegetales no descompuestos de la superficie. Posteriormente, se abrió un sitio de extracción y se recolectó suelo del estrato de 30 a 40 cm de profundidad, considerado relevante para evaluar las condiciones edáficas asociadas con la zona radical del cacao. Este intervalo se seleccionó por formar parte de la zona de mayor actividad radical del cacao. En sistemas agroforestales se ha documentado que una proporción importante de las raíces finas y gruesas de Theobroma cacao se distribuye en los primeros 40 cm del perfil del suelo, incluido el estrato de 30 a 40 cm (Nygren et al., 2013). Por ello, las propiedades físicas y químicas determinadas en este estudio se interpretaron específicamente para este estrato de importancia radical y no como una caracterización integral del perfil edáfico. Las muestras simples obtenidas dentro de un mismo sitio se reunieron y homogeneizaron para formar una muestra compuesta. De esta manera, se obtuvieron cinco muestras compuestas, cuatro correspondientes a los cacaotales bajo manejo agroecológico y una al acahual. Cada muestra se colocó en una bolsa limpia, cerrada e identificada con el código del sitio, y se transportó al laboratorio para su procesamiento.

En el laboratorio, las muestras compuestas se secaron al aire a temperatura ambiente, se desagregaron manualmente y se retiraron piedras, raíces y otros residuos visibles. Posteriormente, el suelo se tamizó con una malla de 2 mm y se homogeneizó antes de realizar las determinaciones físicas y químicas. Cada determinación se realizó por triplicado en las cinco muestras compuestas, de acuerdo con el procedimiento específico correspondiente. Las tres mediciones se consideraron repeticiones analíticas y no réplicas estadísticas independientes; su promedio se utilizó como el valor representativo de cada propiedad para cada muestra compuesta.

Indicadores físicos y químicos

Se determinaron el color, la textura, la capacidad de retención de agua, el pH, la conductividad eléctrica, la capacidad de intercambio catiónico potencial, el carbono orgánico, el nitrógeno Kjeldahl y las concentraciones de nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), amonio (NH_4^+), fosfato (PO_4^{3-}), bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}) y cloruro (Cl^-).

El color se determinó en muestras secas al aire mediante comparación visual con la carta Munsell Soil-Color Charts, edición revisada de 2009. Las observaciones se realizaron con iluminación natural y se registraron el matiz, el valor, el croma y el nombre estandarizado del color (Munsell Color, 2009). Las proporciones de arena, limo y arcilla se determinaron mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos, y la clase textural se asignó con el triángulo textural correspondiente (Bouyoucos, 1962). La capacidad de retención de agua hasta la saturación, las muestras se dejaron drenar durante 24 h y posteriormente se determinó la cantidad de agua retenida, siguiendo una adaptación del procedimiento de saturación y drenaje en embudo descrito por Nelson et al. (2024).

El pH se midió en una suspensión de suelo y agua destilada en proporción 1:2.5, con un potenciómetro portátil Hanna Instruments HI9813-61, equipado con un electrodo HI1285-61.

La conductividad eléctrica se determinó en un extracto acuoso obtenido después de agregar agua destilada al suelo hasta alcanzar la saturación y formar una lámina de aproximadamente 1 cm sobre su superficie. Después de 24 h de reposo, se recuperó la fase líquida y se midió con un conductímetro Oakton con 11 Series Conductivity/TDS/°C meter. Los resultados se expresaron en dS m^{-1}. La capacidad de intercambio catiónico potencial se determinó mediante saturación del complejo de intercambio con cloruro de bario ($BaCl_2$) en una solución amortiguada con trietanolamina a pH 8.1, seguida del desplazamiento del Bario con sulfato de magnesio ($MgSO_4$) y la cuantificación del magnesio remanente mediante titulación con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), de acuerdo con el fundamento de la norma ISO 13536 (ISO, 1995). Los resultados se expresaron en cmol(+) kg^{-1} de suelo.

El carbono orgánico se determinó mediante una modificación del método de oxidación húmeda con dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$). El exceso de dicromato se valoró con sulfato ferroso amoniacal 0.2 N y el resultado se corrigió con base en el contenido de humedad del suelo (Walkley & Black, 1934). Los resultados se expresaron como g C kg^{-1} de suelo. El nitrógeno Kjeldahl se determinó mediante digestión con ácido sulfúrico (H_2SO_4), sulfato de potasio (K_2SO_4) y selenio como catalizador, utilizando un bloque digestor Behrotest InKjel. Posteriormente, el amonio se liberó por alcalinización con hidróxido de sodio (NaOH), se recuperó por destilación en una solución de ácido bórico y se cuantificó mediante titulación con ácido clorhídrico 0.01N (HCl), siguiendo una adaptación del método Kjeldahl para suelos (Bremner, 1996). Los resultados se expresaron como g N kg^{-1} de suelo.

Las formas inorgánicas de nitrógeno se extrajeron con sulfato de potasio (K_2SO_4) 0.5 M. El nitrógeno nítrico, expresado como $N–NO_3^-$, se cuantificó mediante el método colorimétrico del ácido salicílico (Cataldo et al., 1975). El nitrógeno nitroso, expresado como $N–NO_2^-$, se

determinó mediante una modificación de la reacción de Griess; y el nitrógeno amoniacal, expresado como N–NH_4^+, se cuantificó mediante el método colorimétrico del salicilato descrito por Nelson (1983). Los resultados se expresaron en mg N kg^{-1} de suelo. El fósforo extraíble, expresado como P–PO_4^{3-}, se extrajo con bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$) 0.5 M y se cuantificó mediante el método del azul de molibdeno (Olsen et al., 1954; Murphy & Riley, 1962). Los resultados se expresaron como mg P kg^{-1} de suelo.

Las determinaciones colorimétricas y turbidimétricas se realizaron con un espectrofotómetro UV-Vis GBC Cintra 10e (GBC Scientific Equipment, Melbourne, Australia), operado mediante el programa Cintral, versión 2.4. Las absorbancias se midieron a 410 nm para nitrato, 543 nm para nitrito, 667 nm para amonio, 880 nm para fosfato y 340 nm para sulfato. Las concentraciones se calcularon a partir de las ecuaciones de las curvas de calibración y se corrigieron por los factores de dilución y por la masa seca de suelo empleada en cada determinación, cuando correspondió.

Las concentraciones de bicarbonato (HCO_3^-), cloruro (Cl^-) y sulfato (SO_4^{2-}) se determinaron en un extracto acuoso preparado con 50 g de suelo y 200 mL de agua destilada, los procedimientos se realizaron mediante una adaptación del método AS-20 de la NOM-021-RECNAT-2000 al extracto acuoso 1:4 utilizado. Los procedimientos se basaron en una adaptación del método AS-20 DE LA NOM-021-RECNAT-2000 al extracto acuoso utilizado en este estudio. El bicarbonato equivalente (HCO_3^-) se determinó en un extracto acuoso de suelo 1:4 mediante titulación potenciométrica con ácido sulfúrico 0.02 N hasta pH 4.0. La concentración se calculó a partir del volumen de ácido consumido en la titulación y se expresó en mg kg^{-1} de suelo.

El cloruro (Cl^-) se determinó por titulación argentométrica mediante el método de Mohr, con nitrato de plata ($AgNO_3$) y cromato de potasio (K_2CrO_4). Los resultados se expresaron en mg Cl^- kg^{-1} de suelo. El sulfato (SO_4^{2-}) se cuantificó por turbidimetría después de su precipitación como sulfato de bario ($BaSO_4$) con cloruro de bario dihidratado ($BaCl_2 \cdot 2H_2O$). Los resultados se expresaron en mg SO_4^{2-} kg^{-1} de suelo.

Análisis estadístico

La unidad de análisis fue cada muestra compuesta de suelo: cuatro sistemas agroforestales de cacao (SAF1–SAF4) y un acahual utilizado como referencia (A). Las determinaciones de laboratorio se realizaron por triplicado y se promediaron antes del análisis. Estas repeticiones se consideraron exclusivamente analíticas y no observaciones estadísticamente independientes; por tanto, el análisis se realizó con cinco unidades independientes (n = 5).

Las variables cuantitativas se describieron mediante media, desviación estándar, mediana, mínimo y máximo. La clase textural, la notación Munsell y el color del suelo se presentaron

de forma cualitativa. Los resultados de nitrito (<4 mg kg^{-1} en todas las muestras) se conservaron como datos censurados y no se incluyeron en los análisis numéricos, porque no se conoció su concentración exacta ni presentaron variación entre muestras.

Para el análisis de componentes principales (ACP) se seleccionaron previamente cuatro variables: carbono orgánico (CO), capacidad de intercambio catiónico potencial (CIC), capacidad de retención de agua (CRA) y arcilla. Estas representaron, respectivamente, las dimensiones orgánica, química, hídrica y mineral del suelo. La selección previa de un número reducido de variables se realizó para explorar la estructura multivariada de estas dimensiones edáficas sin incorporar al ACP el conjunto completo de propiedades determinadas. Las demás propiedades permanecieron en la caracterización descriptiva, pero no se incorporaron al ACP para mantener una matriz reducida y adecuada al número de muestras.

Para explorar las relaciones lineales entre las cuatro variables seleccionadas se calcularon las matrices de correlación de Pearson y de covarianza muestral. Los coeficientes de correlación se utilizaron exclusivamente para describir la dirección y magnitud de las asociaciones observadas entre las cinco unidades de estudio; no se realizaron pruebas de significancia ni inferencias poblacionales debido al reducido número de observaciones independientes.

Debido a que las variables se expresaron en diferentes unidades, se estandarizaron mediante puntuaciones (z), con media cero y desviación estándar igual a uno. El ACP se efectuó sobre la matriz de datos estandarizados, equivalente a utilizar la matriz de correlaciones. Los componentes principales se examinaron con base en sus autovalores y en el porcentaje de varianza explicada acumulada. Para la representación e interpretación exploratoria se retuvieron los dos primeros componentes, que en conjunto explicaron más del 70 % de la variabilidad total. La interpretación se basó en las cargas, contribuciones y valores de cos^2 de las variables, así como en las coordenadas, contribuciones y cos^2 de las muestras. Los resultados se representaron mediante un gráfico de sedimentación, un círculo de correlaciones y un biplot.

Debido al reducido número de unidades independientes (n = 5), tanto las correlaciones como el ACP se consideraron procedimientos estrictamente descriptivos y exploratorios. En consecuencia, los patrones multivariados identificados se interpretaron como características específicas de los sitios estudiados y no como estimaciones generalizables a la población de cacaotales de Cunduacán. Los análisis se realizaron en Python mediante Google Colab, utilizando pandas, NumPy, scikit-learn, Matplotlib y Seaborn.

Resultados y discusión

Variación de las propiedades del suelo

Los valores individuales de las propiedades físicas y químicas en los cuatro cacaotales agroforestales y el acahual de referencia se detallan en el Cuadro 1, 2 y 3. Los cuatro SAF registraron valores de pH entre 6.43 y 6.53, mientras que el acahual registró un valor de pH igual a 7.40. Por tanto, los suelos de los SAF mostraron una reacción ligeramente ácida y el acahual una condición más próxima a la neutralidad. La conductividad eléctrica fue baja en todas las muestras, aunque SAF4 presentó el valor más alto (0.1396 dS m^{-1}), aproximadamente tres veces superior al registrado en los otros cacaotales. Estos resultados evidenciaron una mayor homogeneidad del pH entre los SAF y una mayor variación de la conductividad eléctrica entre los sitios. La poca variación del pH y la mayor heterogeneidad de la conductividad muestran que estas propiedades respondieron de manera diferente entre los sitios. Este comportamiento coincide con la variabilidad edáfica documentada en cacaotales de Tabasco, donde las propiedades del suelo dependen de las condiciones específicas de cada sistema (Brito-Vega et al., 2018).

La CIC potencial varió de 20.24 a 29.46 cmol(+) kg^{-1} en los cacaotales y alcanzó 30.56 cmol(+) kg^{-1} en el acahual. El carbono orgánico presentó mayor variación: SAF1 registró 2.44 g C kg^{-1}, valor semejante al acahual (2.42 g C kg^{-1}), mientras que SAF2 mostró el menor contenido (0.89 g C kg^{-1}). El NTK osciló entre 0.18 y 0.27 g N kg^{-1} en los SAF, y el acahual presentó 0.25 g N kg^{-1}. En conjunto, la CIC potencial, el CO y el NTK no mostraron un patrón común que permitiera diferenciar consistentemente los cuatro cacaotales del acahual. Las diferencias observadas correspondieron, por tanto, a la variabilidad entre los sitios estudiados y se interpretaron en el contexto de las condiciones particulares de cada sitio.

Cuadro 1. Propiedades químicas del suelo en cuatro sistemas agroforestales de cacao y un acahual de referencia de Cunduacán, Tabasco.

Muestra	pH	CE (dS m^{-1})	CIC potencial (cmol(+) kg^{-1})	CO (g C kg^{-1})	NTK (g N kg^{-1})
A	7.40	0.0517	30.56	2.42	0.25
SAF1	6.50	0.0530	20.24	2.44	0.20
SAF2	6.43	0.0469	29.46	0.89	0.21
SAF3	6.50	0.0440	27.22	1.22	0.27

SAF4	6.53	0.1396	25.66	1.74	0.18

Nota: A = acahual de referencia; SAF = sistema agroforestal de cacao; CE = conductividad eléctrica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; CO = carbono orgánico; NTK = nitrógeno total Kjeldahl. Los valores corresponden al promedio de tres repeticiones analíticas. **Fuente:** elaboración propia con resultados de laboratorio.

El nitrato varió entre 4.49 y 9.61 mg kg^{-1}, el amonio entre 0.20 y 0.81 mg kg^{-1} y el fósforo extraíble entre 5.08 y 11.81 mg kg^{-1} en los cacaotales. El nitrito permaneció por debajo del límite de cuantificación (<4 mg kg^{-1}) en todas las muestras. La variación observada en las formas inorgánicas de nitrógeno y en el fósforo extraíble mostró que los cuatro cacaotales no presentaron una condición nutrimental homogénea en el estrato de 30-40 cm evaluado.

Los contrastes numéricos más marcados se observaron en los aniones. El bicarbonato presentó valores de 650.85 a 1269.15 mg kg^{-1} en los SAF, superiores al valor registrado en el acahual (455.59 mg kg^{-1}). El sulfato varió entre 1534.04 y 1977.16 mg kg^{-1} en los cacaotales, mientras que el acahual presentó 117.84 mg kg^{-1}. En contraste, el cloruro alcanzó su mayor concentración en el acahual (274.17 mg kg^{-1}), frente a valores de 122.90 a 198.54 mg kg^{-1} en los SAF. Estos contrastes describen diferencias marcadas en la composición iónica de las muestras; sin embargo, el diseño observacional y la ausencia de replicación del acahual no permiten establecer si estas diferencias se relacionan con el manejo, con las condiciones edáficas preexistentes o con otras características particulares de los sitios.

Cuadro 2. Formas inorgánicas de nutrientes y aniones del suelo en cuatro sistemas agroforestales de cacao y un acahual de referencia de Cunduacán, Tabasco.

Muestra	$N–NO_3^-$ (mg kg^{-1})	$N–NO_2^-$ (mg kg^{-1})	$N–NH_4^+$ (mg kg^{-1})	P extraíble (mg P kg^{-1})	HCO_3^- equivalente (mg kg^{-1})	SO_4^{2-} (mg kg^{-1})	Cl^- (mg kg^{-1})
A	7.20	<4	0.64	6.83	455.59	117.84	274.17
SAF1	5.53	<4	0.81	11.81	1269.15	1885.19	198.54
SAF2	7.62	<4	0.70	5.08	650.85	1591.58	170.17
SAF3	4.49	<4	0.47	9.30	715.93	1534.04	122.90
SAF4	9.61	<4	0.20	7.05	846.10	1977.16	141.81

Nota: A = acahual de referencia; SAF = sistema agroforestal de cacao. Los valores corresponden al promedio de tres repeticiones analíticas. El símbolo <4 indica concentraciones inferiores al límite de cuantificación. **Fuente:** elaboración propia con resultados de laboratorio.

Las muestras A, SAF1 y SAF2 se clasificaron como franco arcillosas, SAF3 como arcillosa y SAF4 como franca. La CRA varió entre 38.55 y 51.88% en los cacaotales y fue de 46.35% en el acahual. SAF3 combinó el mayor contenido de arcilla (44.16%) con una CRA alta (51.71%), mientras que SAF4 presentó los valores más bajos de arcilla (20.83%) y CRA (38.55%). Este comportamiento sugirió una asociación positiva entre el contenido de arcilla y la capacidad de retención de agua en las muestras estudiadas, relación que posteriormente se examinó mediante el análisis de correlación y el ACP.

Cuadro 3. Propiedades físicas, textura y color del suelo en cuatro sistemas agroforestales de cacao y un acahual de referencia de Cunduacán, Tabasco.

Muestra	CRA (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Clase textural	Munsell seco	Color
A	46.35	34.16	38.67	27.17	Franco arcilloso	10YR 6/4	Pardo claro amarillento
SAF1	48.51	36.16	38.00	25.84	Franco arcilloso	10YR 4/6	Pardo oscuro amarillento
SAF2	51.88	32.16	30.67	37.17	Franco arcilloso	10YR 6/4	Pardo claro amarillento
SAF3	51.71	44.16	36.67	19.17	Arcilla	10YR 5/4	Pardo amarillento
SAF4	38.55	20.83	32.67	46.51	Franco	10YR 3/3	Pardo oscuro

Nota: A = acahual de referencia; SAF = sistema agroforestal de cacao; CRA = capacidad de retención de agua. Los valores corresponden al promedio de tres repeticiones analíticas. **Fuente:** elaboración propia con resultados de laboratorio.

Relaciones entre las variables seleccionadas

La asociación lineal de mayor magnitud se observó entre la capacidad de retención de agua y el contenido de arcilla (r = 0.839). Este coeficiente indicó una asociación positiva elevada entre ambas variables en las cinco unidades estudiadas, de manera que los sitios con mayor

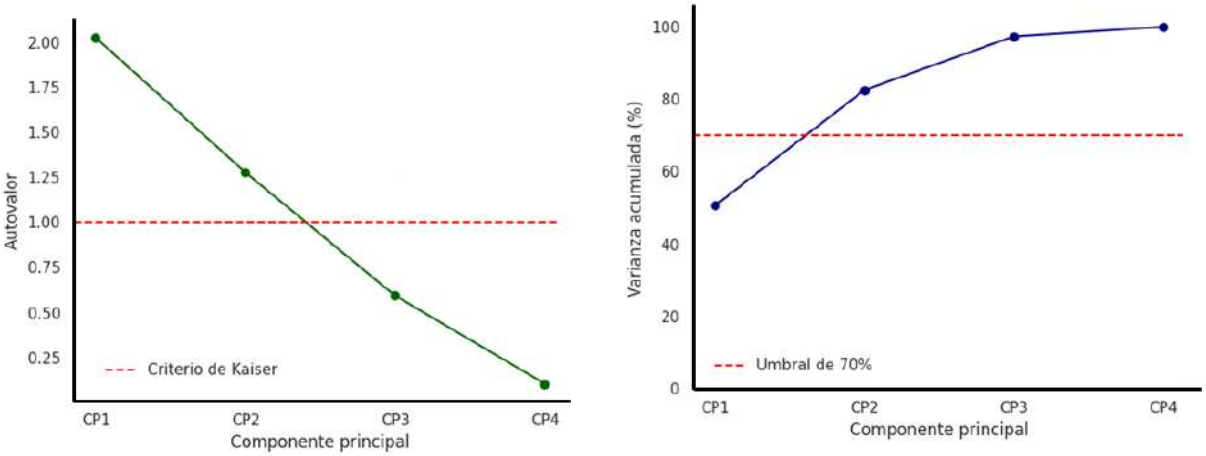
contenido de arcilla tendieron a presentar mayor capacidad de retención de agua. El CO presentó asociaciones negativas con la CIC (r = −0.400) y con la CRA (r = −0.393). Las demás asociaciones fueron de menor magnitud: CIC–CRA (r = 0.142), CO–arcilla (r = −0.089) y CIC–arcilla (r = 0.003).

La asociación positiva entre arcilla y CRA fue coherente con el comportamiento observado en SAF3 y SAF4. SAF3 presentó el mayor contenido de arcilla (44.16 %) y una CRA elevada (51.71 %), mientras que SAF4 registró simultáneamente los menores valores de arcilla (20.83 %) y CRA (38.55 %). Este patrón es consistente con la participación de la fracción fina del suelo en su comportamiento hídrico, ya que una mayor proporción de arcilla puede favorecer la retención de agua debido a su mayor superficie específica y a la proporción de poros de menor tamaño. En contraste, las asociaciones del CO con la CIC y la CRA fueron negativas, mientras que su relación con la arcilla fue débil. Por tanto, dentro del conjunto de muestras analizado, el CO no varió en la misma dirección que la CIC, la CRA o el contenido de arcilla. Este comportamiento indica que la estructura de variación de las propiedades edáficas evaluadas no puede explicarse a partir de un solo indicador. En sistemas agroforestales de cacao se ha documentado que propiedades como el pH, la CIC, la materia orgánica y las características hídricas pueden variar en función del sistema de manejo, la profundidad y las condiciones particulares del sitio (Arévalo-Gardini et al., 2015). En conjunto, las asociaciones observadas evidenciaron patrones diferenciados entre las propiedades edáficas de los sitios estudiados, los cuales se exploraron posteriormente mediante el ACP.

Análisis de componentes principales

Los dos primeros componentes explicaron conjuntamente 82.54% de la variabilidad total. El CP1 presentó un autovalor de 2.02 y explicó 50.62%, mientras que el CP2 tuvo un autovalor de 1.28 y explicó 31.93%. La elevada proporción de variabilidad representada por ambos componentes permitió describir en un plano bidimensional los principales patrones de variación conjunta de las cuatro propiedades edáficas seleccionadas (Figura 2).

El CP1 representó principalmente un gradiente hídrico-textural. La CRA presentó una carga de 0.944 y una contribución de 44.00 %, mientras que la arcilla tuvo una carga de 0.824 y contribuyó con 33.52 %. En conjunto, ambas variables aportaron 77.52 % a la construcción del CP1. La dirección positiva y la magnitud de sus cargas mostraron que el aumento del CP1 estuvo asociado principalmente con mayores valores de cra y contenido de arcilla. En este gradiente, SAF3 y SAF2 se ubicaron hacia el extremo positivo, asociados con una mayor retención de agua, mientras que SAF4 ocupó el extremo negativo, caracterizado por los menores valores de CRA y arcilla.



a) Gráfico de sedimentación.

b) Gráfico de la varianza explicada acumulada.

Figura 2. Autovalores y varianza explicada acumulada del análisis de componentes principales. (a) Gráfico de sedimentación con el criterio de Kaiser; (b) varianza explicada acumulada con umbral de referencia del 70 %. Fuente: elaboración propia. **Fuente:** elaboración propia.

El CP2 estuvo definido principalmente por la CIC potencial, con una carga de 0.769 y una contribución de 46.33 %, y por el CO, con una carga de −0.620 y una contribución de 30.06 %. Las cargas de signo opuesto indicaron que este componente representó principalmente un contraste entre ambas propiedades dentro del conjunto de muestras analizado. SAF1 se ubicó hacia el extremo negativo del componente, relacionado con su mayor contenido de CO y menor CIC potencial, mientras que SAF2 se situó hacia el extremo positivo, asociado con una CIC relativamente alta y un menor contenido de CO. De esta manera, el CP2 complementó el gradiente hídrico-textural del CP1 al incorporar una segunda dimensión de variación relacionada principalmente con las propiedades químicas del suelo.

La distribución conjunta de las muestras y de las variables seleccionadas se presenta en el biplot de los dos primeros componentes principales (Figura 3). La orientación y proximidad de los vectores de CRA y arcilla mostraron su variación conjunta y su participación predominante en la configuración del CP1. En el CP2, la CIC potencial y el CO se

proyectaron en direcciones contrastantes, en concordancia con las cargas de signo opuesto observadas para este componente.

SAF4 y SAF3 fueron las muestras con mayor contribución al CP1, con 49.62 y 31.41 %, respectivamente. Ambas ocuparon posiciones contrastantes a lo largo de este componente: SAF3 se asoció con mayores valores de arcilla y CRA, mientras que SAF4 se caracterizó por los menores valores de ambas propiedades. En el CP2 destacaron SAF1, con una contribución de 63.71 %, y SAF2, con 21.46 %. SAF1 se relacionó principalmente con el sector definido por el CO, mientras que SAF2 se proyectó hacia el sector asociado con una mayor CIC potencial. Esta distribución evidenció que los principales contrastes multivariados entre los cacaotales estuvieron asociados, en el CP1, con las propiedades hídricas y texturales y, en el CP2, con el comportamiento diferenciado de la CIC potencial y el CO.

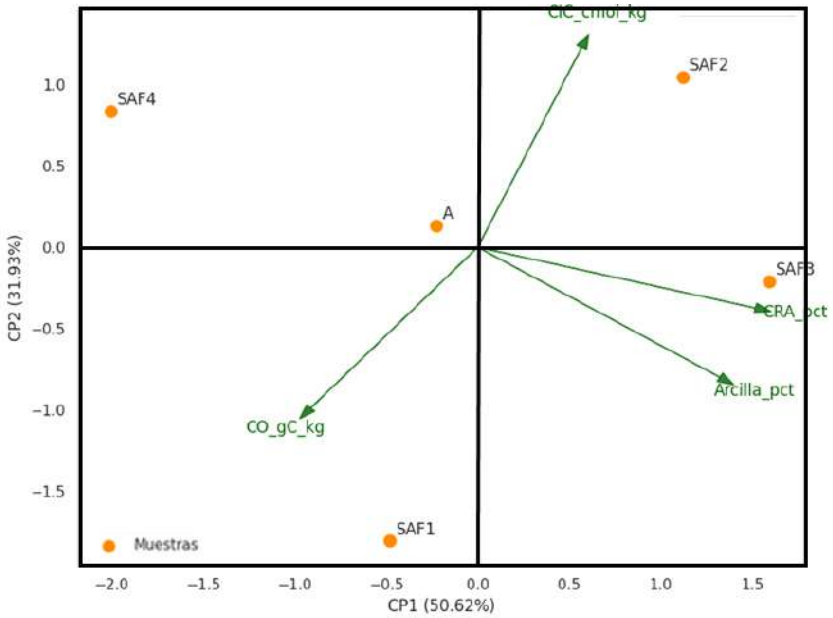


Figura 3. Biplot de los dos primeros componentes principales de las propiedades edáficas seleccionadas en los cuatro cacaotales agroforestales y el acahual de referencia. Fuente: elaboración propia. **Fuente:** elaboración propia.

El acahual se ubicó próximo al origen en el plano formado por CP1 y CP2 y presentó una baja calidad de representación en estos dos componentes. Su posición central estuvo relacionada con la combinación de sus valores de CO, CIC potencial, CRA y arcilla, sin mostrar una asociación predominante con los extremos definidos por los dos primeros

componentes. Por tanto, el acahual ocupó una posición intermedia en la representación bidimensional, mientras que los contrastes más marcados del espacio multivariado estuvieron determinados principalmente por los cuatro cacaotales.

En conjunto, los resultados mostraron una asociación marcada entre el contenido de arcilla y la capacidad de retención de agua, mientras que las propiedades químicas evaluadas presentaron patrones de variación diferenciados entre los sitios. El acahual ocupó una posición intermedia en el plano definido por los dos primeros componentes, sin mostrar una diferenciación multivariada marcada respecto de los cacaotales. La heterogeneidad edáfica observada es consistente con estudios realizados en sistemas agroforestales de cacao, en los que se han documentado variaciones en propiedades físicas y químicas del suelo asociadas con las características del sistema, el manejo, la profundidad de evaluación y las condiciones particulares de cada sitio (Arévalo-Gardini et al., 2015; Asigbaase et al., 2021). En este sentido, los patrones identificados aportan una caracterización integrada de la variabilidad edáfica de los sitios estudiados y constituyen una base para su posterior monitoreo.

Conclusiones

Los cacaotales bajo manejo agroecológico presentaron condiciones edáficas heterogéneas, principalmente en el contenido de carbono orgánico, conductividad eléctrica, aniones, textura y capacidad de retención de agua. Esta variabilidad evidenció que los cuatro sistemas presentaron configuraciones fisicoquímicas particulares, aun cuando compartían características generales de manejo agroecológico. La relación de mayor magnitud se presentó entre el contenido de arcilla y la capacidad de retención de agua ($r = 0.839$). El análisis de componentes principales mostró que el CP1 (50.62 %) estuvo definido principalmente por la capacidad de retención de agua y el contenido de arcilla, mientras que el CP2 (31.93 %) representó principalmente el contraste entre la capacidad de intercambio catiónico potencial y el carbono orgánico. El acahual ocupó una posición intermedia en el plano definido por los dos primeros componentes y no presentó una diferenciación multivariada marcada respecto de los cacaotales. Su incorporación como referencia local permitió contextualizar la variabilidad de las propiedades físicas y químicas observada en los sistemas agroforestales. En conjunto, el análisis permitió reconocer los principales contrastes edáficos entre los sitios y establecer una caracterización de referencia para su monitoreo.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados muestran que conocer las condiciones edáficas particulares de cada cacaotal es fundamental para orientar su manejo. El monitoreo de propiedades relacionadas con la retención de agua, la materia orgánica y la fertilidad del suelo puede facilitar la identificación oportuna de cambios en su condición y apoyar la selección de prácticas acordes con las necesidades de cada sitio. De esta manera, la

caracterización y el monitoreo del suelo pueden convertirse en herramientas prácticas para que los productores ajusten el manejo de sus cacaotales, conserven la capacidad productiva del suelo y favorezcan, a mediano y largo plazo, la productividad y sostenibilidad de sus sistemas agroforestales.

Literatura citada

Arévalo-Gardini, E., Canto, M., Alegre, J., Loli, O., Julca, A., & Baligar, V. (2015). Changes in soil physical and chemical properties in long term improved natural and traditional agroforestry management systems of cacao genotypes in Peruvian Amazon. PLOS ONE, 10(7), e0132147. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132147

Asigbaase, M., Lomax, B. H., Dawoe, E., & Sjogersten, S. (2021). Influence of organic cocoa agroforestry on soil physico-chemical properties and crop yields of smallholders' cocoa farms, Ghana. Renewable Agriculture and Food Systems, 36(3), 255-264. https://doi.org/10.1017/S1742170520000290

Bahena-Osorio, Y., Franco-Hernández, M. O., Pueyo, J. J., & Vásquez-Murrieta, M. S. (2023). Development of a quality index to evaluate the impact of abiotic stress in saline soils in the geothermal zone of Los Negritos, Michoacán, Mexico. Agronomy, 13(6), 1650. https://doi.org/10.3390/agronomy13061650

Bremner, J. M. (1996). Nitrogen—Total. En D. L. Sparks et al. (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 3. Chemical methods* (pp. 1085–1121). Soil Science Society of America. https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37

Brito-Vega, H., Salaya-Domínguez, J. M., Gómez-Méndez, E., Gómez-Vázquez, A., & Antele-Gómez, J. B. (2018). Physico-chemical properties of soil and pods (Theobroma cacao L.) in cocoa agroforestry systems. Journal of Agronomy, 17(1), 48–55. https://doi.org/10.3923/ja.2018.48.55

Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agronomy Journal*, *54*(5), 464–465. https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x

Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T. W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groenigen, J. W., & Brussaard, L. (2018). Soil quality- A critical review. *Soil Biology and Biochemistry, 120*, 105-125. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030

Cataldo, D. A., Haroon, M., Schrader, L. E., & Youngs, V. L. (1975). Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications*

in Soil Science and Plant Analysis, *6*(1), 71–80.https://doi.org/10.1080/00103627509366547

Chávez-García, E., & Castelán-Estrada, M. (2019). Evaluación campesina del manejo agroecológico de plantaciones de cacao (Theobroma cacao L.) en Tabasco, México. *Agroproductividad*, 12(7), 43–49. https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1438

Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. Applied Soil Ecology, 15(1), 3-11. https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6

Fisher-Ortíz, R. A., Rodríguez-Robles, U., Aldasoro-Maya, E. M., Soto-Pinto, M. L., & Chávez-García, E. (2022). Cacao agroforestry systems and resilience: Potential factors in the face of the climate change in Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, *25*(2), Article 058. https://doi.org/10.56369/tsaes.4121

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010: Cunduacán, Tabasco (clave geoestadística 27006). https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/27/27006.pdf

International Organization for Standardization. (1995). *ISO 13536: Soil quality—Determination of the potential cation exchange capacity and exchangeable cations using barium chloride solution buffered at pH 8.1*.

Lizcano Toledo, R., Olivera Viciedo, D., Saavedra Mora, D., Machado Cuellar, L., Valencia, E. R., Moreno Pérez, M. F., & Flórez, M. F. (2017). *Muestreo de suelos, técnicas de laboratorio e interpretación de análisis de suelos*. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA).

Munsell Color. (2009). *Munsell soil-color charts: 2009 revised edition*. X-Rite.

Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, *27*, 31-36. https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5

Nygren, P., Leblanc, H. A., Lu, M., & Gómez Luciano, C. A. (2013). Distribution of coarse and fine roots of Theobroma cacao and shade tree Inga edulis in a cocoa plantation. Annals of Forest Science, 70, 229–239. https://doi.org/10.1007/s13595-012-0250-z

Nelson, D. W. (1983). Determination of ammonium in KCl extracts of soils by the salicylate method. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *14*(11), 1051-1062. https://doi.org/10.1080/00103628309367431

Nelson, J. T., Adjuik, T. A., Moore, E. B., VanLoocke, A. D., Ramirez Reyes, A., & McDaniel, M. D. (2024). A simple, affordable, do-it-yourself method for measuring soil maximum water holding capacity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. https://doi.org/10.1080/00103624.2023.2296988

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. *Diario Oficial de la Federación*.

Wezel, A., Herren, B. G., Kerr, R. B., Barrios, E., Gonçalves, A. L. R., & Sinclair, F. (2020). Agroecological principles and elements and their implications for transitioning to sustainable food systems: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *40*, Article 40. https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z

Correlación entre producción de resina de copal y morfología de árboles productores

Rosa María García Núñez[27]

Resumen

El copal es una resina de gran importancia religiosa, ceremonial y económica en México, obtenida principalmente de especies del género *Bursera*. La sobreexplotación y la falta de manejo adecuado ponen en riesgo la permanencia de los árboles productores en la región Mixteca Poblana. El objetivo de este trabajo fue evaluar el grado de asociación entre variables morfológicas (altura total, diámetro del tallo y diámetro de dos ramas principales) y la condición del árbol con la producción de resina en 100 árboles de *Bursera bipinnata* (n=72) y *Bursera copallifera* (n=28) en el ejido San Juan Raboso, Izúcar de Matamoros, Puebla. Mediante muestreo aleatorio simple en 54 unidades muestrales, se registraron las variables dasométricas y se evaluó la producción de resina y la condición del árbol con escalas hedónicas. El análisis se realizó con el coeficiente de correlación de Spearman. Los resultados mostraron una alta correlación entre el diámetro del árbol y el diámetro de las ramas ($\rho = 0.82$ y 0.78), así como una correlación positiva y moderada entre la producción de resina y las variables dasométricas, siendo el diámetro del tallo el de mayor asociación ($\rho = 0.57$). La condición del árbol presentó el menor grado de correlación con la producción de resina. Se concluye que las variables morfológicas, particularmente el diámetro, pueden emplearse como indicadores predictivos del potencial productivo de resina en árboles de copal, lo cual es útil para orientar planes de manejo sustentable del recurso.

Palabras clave: *Bursera bipinnata*; *Bursera copallifera*; correlación de Spearman; variables dasométricas; producción de resina

Abstract

Copal is a resin of great religious, ceremonial, and economic importance in Mexico, obtained mainly from species of the genus *Bursera*. Overexploitation and inadequate management practices threaten the persistence of resin-producing trees in the Mixteca Poblana region. The objective of this study was to assess the degree of association between morphological variables (total height, stem diameter, and diameter of two main branches) and tree condition with resin production in 100 trees of *Bursera bipinnata* (n=72) and *Bursera copallifera*

[27] Maestria en Agroforestería. Universidad Autónoma Chapingo. Correo: rgarcian@chapingo.mx

(n=28) in the San Juan Raboso ejido, Izúcar de Matamoros, Puebla. Using simple random sampling across 54 sampling units, dasometric variables were recorded, and resin production and tree condition were evaluated using hedonic scales. Data were analyzed using Spearman's correlation coefficient. Results showed a high correlation between tree diameter and branch diameters ($\rho = 0.82$ and 0.78), as well as a positive, moderate correlation between resin production and dasometric variables, with stem diameter showing the strongest association ($\rho = 0.57$). Tree condition showed the weakest correlation with resin production. It is concluded that morphological variables, particularly diameter, can be used as predictive indicators of resin production potential in copal trees, which is useful for guiding sustainable management plans for this resource.

Keywords: *Bursera bipinnata*; *Bursera copallifera*; Spearman correlation; dasometric variables; resin production

Introducción

El bosque tropical caducifolio alberga una gran cantidad de productos forestales no maderables (PFNM) de gran importancia para el desarrollo de las comunidades rurales que habitan en o cerca de los bosques, los cuales son aprovechados constantemente. Entre las categorías reconocidas se encuentran las fibras, gomas, ceras, rizomas, tierra de monte y resinas (Tapia-Tapia y Reyes-Chilpa, 2008).

La resina aromática del copal es uno de los PFNM comúnmente aprovechados en este tipo de bosque, se obtiene de especies del género *Bursera*, uno de los géneros más característicos de este tipo de vegetación (Rzedowski y Calderón de Rzedowski, 2013), destacando *Bursera bipinnata* y *Bursera copallifera*, conocidas como copal chino o santo y copal ancho. El copal es una resina de gran importancia religiosa-ceremonial y contribuye económicamente a muchos hogares, en los templos se quema como medio de purificación (Linares y Bye, 2008) y es considerado como alimento divino presente en los rituales de ofrenda (Montúfar, 2016). La extracción de resina del copal forma parte subsidiaria del trabajo campesino y no interfiere con sus actividades cotidianas, sin embargo, es estacional, y les proporciona recursos económicos en un tiempo del año donde aún no hay cosecha agrícola (Cruz et al., 2006).

Existen diversos factores que ponen en riesgo la permanencia de las especies productoras de copal dentro de la comunidad vegetal, sobresaliendo el deterioro de la condición morfológica de los árboles resinados, originado principalmente por su sobreexplotación, producto de la demanda de su resina y la falta de tiempos de descanso necesario para la recuperación del árbol después de la resinación, lo que puede ocasionar debilitamiento. Aunque existen Normas Oficiales Mexicanas que permiten regular el aprovechamiento de los recursos

forestales no maderables en México, en el caso de la resina del copal un requisito fundamental es la elaboración de planes de manejo que incluyan un inventario y el cálculo del rendimiento del producto. Sin embargo, la gran mayoría de los árboles en aprovechamiento se encuentran en propiedad ejidal o comunal en donde el aprovechamiento se realiza por muchos copaleros en forma independiente, con muy poca organización y no se acatan a las normas existentes para el buen aprovechamiento del recurso (Purata, 2008), como es el caso de muchas regiones copaleras como la región Mixteca Poblana. A la fecha, sigue siendo escasa la evidencia sobre la cantidad de resina que puede extraerse de un árbol con base en sus características morfológicas y fisiológicas (Buendía-Espinoza et al., 2022), y se ha documentado que la sobreexplotación del copal modifica la composición y diversidad de especies del bosque tropical caducifolio en esta misma región (García-Núñez et al., 2023). Por lo que, el objetivo de este trabajo fue evaluar el grado de asociación entre algunas variables morfológicas de árboles productores de copal con la producción de resina en la región de Izúcar de Matamoros, donde el copal forma parte fundamental en diversas actividades de la comunidad.

Materiales y métodos

El área de estudio fue el "cerro de la virgen", ubicado en la región hidrográfica del Balsas en el ejido de San Juan Raboso, municipio de Izúcar de Matamoros, ubicado al suroeste del estado de Puebla, México, en la microcuenca hidrográfica Agua Escondida, con una superficie de 6492 ha. altitud entre 1000 y 1600 msnm y un rango de temperatura de 19 – 25 ° C y precipitación entre 700 – 900 mm. clima cálido subhúmedo con lluvias en verano y semicálido subhúmedo con lluvias en verano. El principal uso de suelo es la agricultura y el tipo de vegetación predominante es de selva baja caducifolia ocupando el 17 % de la superficie (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2017).

Para el levantamiento de los datos de la vegetación se realizó un muestreo aleatorio simple. La unidad de muestreo fue un cuadrante de 10 m^2, y se ubicaron 54 unidades muestrales donde se midieron las variables dasométricas de 100 árboles de copal presentes de las especies *B. bipinnata* y *B. copalifera,* a cada uno se les registró sus coordenadas geográficas mediante un sistema de posicionamiento global (GPS), condición y las variables dasométricas: altura total, diámetro del tallo y diámetro de dos ramas principales (Reyes-Ramos et al., 2019).

Para el análisis de datos se utilizó la Correlación de Spearman, el cual es un método no paramétrico que proporciona un coeficiente que examina la intensidad de la relación entre dos variables, en cualquier tipo de asociación no necesariamente lineal, además permite identificar si al aumentar el valor de una, aumenta o disminuye el valor de la otra ya que los rangos de este coeficiente van de -1.0 hasta +1.0. Valores cercanos a 1 y a -1.0 indican una

fuerte asociación señalan que hay una fuerte asociación positiva o negativa entre las clasificaciones, es decir que, al aumentar un rango, el otro decrece, cuando el valor es 0.0, no hay correlación (Mondragón Barrera, 2014).

La fórmula de este coeficiente es:

$$r_s = 1 - \frac{6\sum d_1^2}{n(n^2-1)}$$

Siendo: n= la cantidad de sujetos que se clasifican xi =el rango de sujetos i con respecto a una variable yi = el rango de sujetos i con respecto a una segunda variable di =xi - yi Es decir que di, es la diferencia entre los rangos de X y Y.

La Producción de resina de copal y condición del árbol fueron evaluadas utilizando escalas hedónicas, que consistieron en la asignación de tres puntos; el valor 1 correspondió a una producción y condición baja, el valor 2 a una producción y condición regular y el valor 3 a una producción de resina y condición del árbol buena.

Resultados y discusión

Métricas descriptivas de los árboles productores de resina de copal

Las características físicas de las variables evaluadas relacionadas con la producción de la resina de copal en *B. bipinnata* y *B. copallifera* en el área de estudio se presentan en el Cuadro 1. *B. copallifera* muestra los mayores valores promedio de altura (206.43±40.55) y diámetro de árbol (32.34±8.25) en comparación con valores de los árboles de *B. bipinnata*. En cuanto al promedio del diámetro por rama (1 y 2) de los árboles, la especie *B. copallifera* presentó los valores más altos (21.45±6.40, 19.54±6.22) mientras que los árboles de *B. bipinnata* presentaron los valores más bajos.

Cuadro 1. Estadísticos básicos de las características físicas de los árboles evaluados de *B. bipinnata* (n = 72) y *B. copallifera* (n = 28).

	Altura total (cm)		Diámetro (cm)		Drma (cm)[¶]		Drmb (cm)[‡]	
Especie	Media ± DE[z]	CV[†]	Media ± DE	CV	Media ± DE	CV	Media ± DE	CV

B. bipinnata	199.26±38.59	19.37	29.16±7.21	24.72	19.34±6.07	31.36	17.37±5.67	32.66
Bursera copallifera	206.43±40.55	19.64	32.34±8.25	25.51	21.45±6.40	29.84	19.54±6.22	31.81

[z]DE: desviación estándar; [†]CV: coeficiente de variación (%); [¶]Drma: diámetro de la rama 1; [‡]Drmb: diámetro de la rama 2.

La mayoría de los árboles muestreados presentaron una condición entre regular y buena (> 80%), y un porcentaje menor (<20%) tuvieron una condición baja (Cuadro 2). *B. bipinnata* presenta frecuencia relativa más alta (40.28) comparada con *B. copallifera* (32.14), sin embargo, esta última especie presentó frecuencias mayores del arbolado regular (53.57).

Cuadro 2. Tabla de frecuencias para el número de árboles con una condición determinada de las especies evaluadas de *B. bipinnata* (n = 72) y *B. copallifera* (n = 28).

Especie	Condición del árbol	Número de árboles	
		Frecuencia	Frecuencia relativa (%)
B. bipinnata	Baja	11	15.28
	Regular	32	44.44
	Buena	29	40.28
B. copallifera	Baja	4	14.29
	Regular	15	53.57
	Buena	9	32.14

En cuanto a la producción de la resina de copal, la mayoría de los árboles evaluados de *B. bipinnata* y *B. copallifera* presentaron niveles de producción de resina de copal entre regular y buena (Cuadro 3). Sin embargo, 11 árboles de *B. bipinnata* mostraron una frecuencia baja de producción de resina comparada con los de *copallifera* que no presentaron producciones

bajas. Los árboles de mayor producción de resina se presentaron en B. *bipinnata* (35) en comparación con 12 de B. *copallifera*.

Cuadro 3. Tabla de frecuencias para el número de árboles con un nivel de producción determinado de resina de copal de las especies evaluadas de *B. bipinnata* (n = 72) y *B. copallifera* (n = 28).

Especie	Nivel de producción	Número de árboles	
		Frecuencia	Frecuencia relativa (%)
B. bipinnata	Baja	11	15.28
	Regular	26	36.11
	Buena	35	48.61
B. copallifera	Baja	0	0.00
	Regular	16	57.14
	Buena	12	42.86

Correlación entre variables

Se examinó la asociación de todas las variables utilizando el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) (Figura 1). El diámetro del árbol estuvo altamente correlacionado con el diámetro de la rama 1 (ρ = 0.82). El diámetro de la rama 2 presentó un alto grado de correlación y de forma positiva tanto con el diámetro de la rama 1 (ρ = 0.78) como la del árbol (ρ = 0.72), por lo que este alto grado de asociación nos sugiere que cuando medimos alguna de ellas podemos predecir la otra.

La producción de la resina de copal se correlacionó positiva y moderadamente con todas las variables, siendo el diámetro principal el que presentó mayor correlación (ρ = 0.57). Sin embargo, la condición del árbol fue la que mostró una correlación con menor grado comparada con el resto de las variables.



Figura 1. Matriz de correlación para las variables continuas y categóricas de *B. bipinnata* y *B. copallifera*: altura total del árbol (alt), diámetro del árbol (diam), diámetro de la rama 1 (drma), diámetro de la rama 2 (drmb), condición del árbol (cond) y producción de la resina de copal (prod).

La correlación de Spearman sugiere que existe una asociación positiva altamente significativa entre la producción de resina de copal y las variables dasométricas relacionadas a la altura total del árbol, el diámetro del árbol y el diámetro de las ramas (1 y 2) de ambas especies. Además, la producción de resina de copal se correlacionó significativamente con la condición del árbol (Cuadro 4 y 5).

Cuadro 4. Coeficientes de correlación de Spearman (arriba de la diagonal principal) y sus valores de probabilidad (p-value) entre las variables continuas y categóricas de *B. bipinnata* y *B. copallifera*: altura total del árbol (alt), diámetro del árbol (diam), diámetro de la rama 1 (drma), diámetro de la rama 2 (drmb), condición del árbol (cond) y producción de la resina de copal (prod).

Variables	alt	diam[z]	drma	drmb	cond	prod
Alt		0.2954	0.2894	0.2433	-0.0888	0.4053
Diam	<0.01		0.8215	0.7247	0.0267	0.5728
Drma	<0.01	<0.0001		0.7847[s]	0.0416	0.4873
Drmb	<0.05	<0.0001	<0.0001		0.1104	0.5067
Cond	0.3798	0.7920--	0.6810	0.2743		0.4124

Prod	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001

[z]Los coeficientes de correlación de Spearman se obtuvieron con valores observados de n=100 de cada variable.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación de Spearman entre la producción de resina de copal (PR) y las variables dasométricas de los árboles de *B. bipinnata* y *B. copallifera*.

Variable dasométrica	r_s (PR-X_i)[z]	p-value
Altura total del árbol	0.40527	<0.0001
Diámetro del árbol	0.57285	<0.0001
Diámetro de la rama (1)	0.48727	<0.0001
Diámetro de la rama (2)	0.50673	<0.0001
Condición del árbol	0.41244	<0.0001

[z] r_s: correlación de Spearman, PR: producción de resina de copal y X_i: variable dasométrica.

Ya que el diámetro del árbol y su altura presentaron una correlación positiva y significante (Cuadro 4), se incluyó una variable combinada que se construyó multiplicando la altura por el diámetro, la cual puede aportar mayor información relacionada con las categorías de producción. Al realizar la prueba de normalidad a través de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk (Cuadro 6) se encontró que todos los datos son normales con una significancia del 5 % excepto la producción media con la altura y el diámetro con la producción alta. Sin embargo, esto tenderá a disminuir cuando el tamaño de muestra aumente.

Cuadro 6. Pruebas de normalidad de altura, diámetro del tallo principal y su combinación

		Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	PRO	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	Gl	Sig.
ALT	1	.177	11	.200*	.907	11	.224
	2	.145	40	.033	.921	40	.008
	3	.089	44	.200*	.981	44	.693

DIA	1	.195	11	.200*	.921	11	.323
	2	.079	40	.200*	.985	40	.876
	3	.133	44	.049	.942	44	.028
AXD	1	.150	11	.200*	.973	11	.917
	2	.106	40	.200*	.979	40	.670
	3	.104	44	.200*	.976	44	.480

ALT= altura del árbol; DIA= diámetro del árbol; PRO= producción de resina en categorías de producción; AXD= altura por diámetro.

Para poder realizar un análisis más preciso entre estas variables y ver la correlación en cada uno de estos parámetros con la producción se realizaron graficas de caja entre altura y producción (Figura 2), diámetro principal y producción (Figura 3) y la combinación de estas variables y su producción.

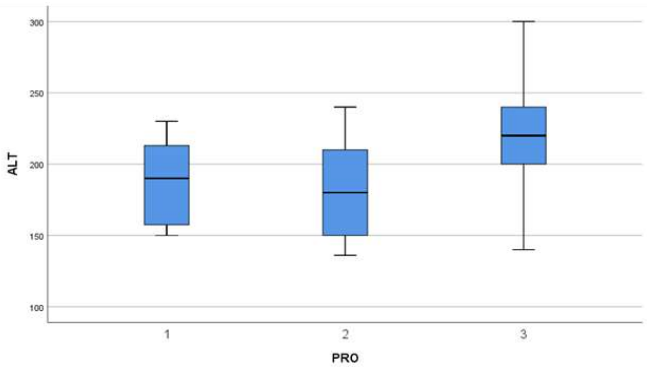


Figura 2. Gráficas de caja entre la altura con la producción categórica de resina de copal.

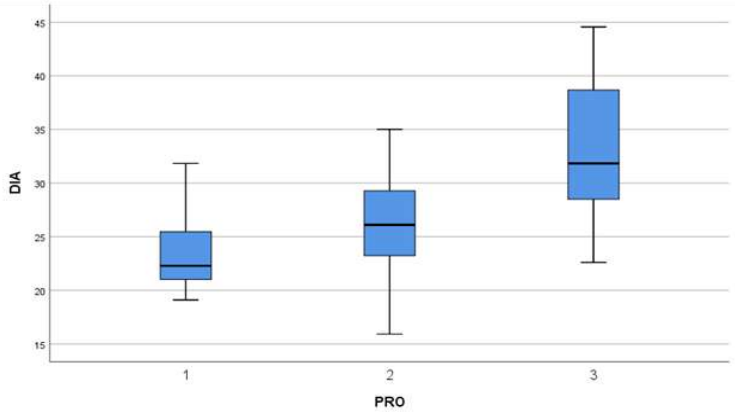


Figura 3. Gráficas de caja entre diámetro principal con la producción categórica de resina de copal.

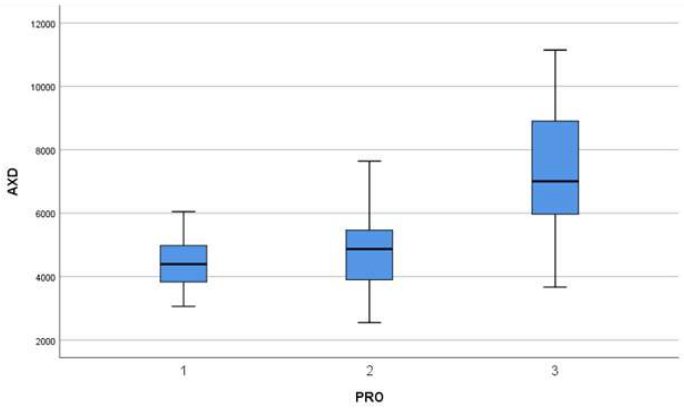


Figura 4. Gráficas de caja de la variable de combinación de altura con diámetro con la producción categórica de resina de copal.

No se encontró relación entre la altura y las categorías de producción de la resina (Figura 3). Sin embargo, sí se encontró una relación directa entre el diámetro y la producción (Figura 4): a mayor diámetro, mayor producción, por lo que existen diferencias de producción entre la categoría baja y la alta; en contraste, dicha diferencia no se presenta entre la categoría de producción media y la baja, ni entre la media y la alta. Dado que las distribuciones de las variables entre categorías se traslapan, estas variables por sí solas no son suficientemente buenas para predecir la producción con base en categorías, debido a que no se controlaron

otras variables, como las del sitio. Por lo tanto, sí se establece una relación, aunque no con mucha precisión.

Cuando se combina la altura con el diámetro (Figura 4), se presenta una diferencia más evidente, ya que se observa con mayor claridad su relación con la producción: el nivel de producción media no muestra diferencias significativas respecto a las otras categorías; sin embargo, la producción alta sí es diferente de la baja y de la media.

Abad-Fitz et al., (2020) mencionan que los árboles con mayor diámetro de tallo principal tienen mayor área de aprovechamiento, pero producen menor cantidad de resina. En el mismo sitio de estudio, Buendía-Espinoza et al. (2022), mediante un modelo de bosques aleatorios (random forest), determinaron que la producción óptima de resina en B. bipinnata y B. copallifera se alcanza con diámetros de tallo de entre 33 y 38 cm, alturas de entre 2 y 2.5 m y diámetros de ramas secundarias de entre 8 y 32 cm, e identificaron a la condición del árbol como la variable de mayor peso predictivo, seguida del diámetro del tallo, lo que coincide con la correlación moderada encontrada en este trabajo entre el diámetro principal y la producción de resina. Esto se explica porque la resina se acumula principalmente en la peridermis, el floema secundario y la corteza —esta última, solo si el tallo es joven—, ya que en especies de Burseraceae los canales secretores de resina se originan y desarrollan preferentemente en el floema primario y secundario (Palermo et al., 2018). La acumulación de resina en la corteza disminuye a medida que el árbol crece, lo que se traduce en una disminución de las fuentes productoras de resina que puede reducir la producción en general (Franceschi et al., 2005).

Conclusiones

En este trabajo se logró identificar los caracteres morfológicos de los árboles productores de la resina de copal en el cerro de la Virgen dentro de la región de la Mixteca Poblana. Se encontró que la producción de la resina de copal se correlacionó positiva y moderadamente con todas las variables (altura, diámetro principal y secundarios y condición morfológica), sin embargo, el diámetro principal fue el que presentó mayor correlación. Lo que nos sugiere considerarlo en forma primaria en la selección del arbolado a resinar, pero es muy importante no aprovechar aquellos árboles que tengan diámetros inferiores a los 20 cm ni mayores de 60, ya que la resina se acumula principalmente en la peridermis, el floema secundario y en la corteza, si el tallo es joven, por lo que, la acumulación de la resina en la corteza disminuye a medida que el árbol crece, lo que se traduce en una disminución de las fuentes productoras de resina que puede reducir en general la producción. En árboles con diámetros mayores se pudiera considerar que a mayor diámetro de tallo principal, mayor área de aprovechamiento, pero producen menor cantidad de resina.

Se deben de considerar otros factores en el sistema de aprovechamiento como el número de caras a resinar, dimensiones en ancho, largo y profundidad de las caras, herramientas para hacer los cortes, tiempos de descanso de los árboles resinados entre otros, lo que nos evitaría decaimiento e inclusive muerte del arbolado. Además, otras medidas que deberían incluirse son: prácticas para incrementar la regeneración de las especies de copal, regulación de las capacidades de carga de los animales que se encuentran pastoreando, elaboración de algunas obras para conservar el suelo en las partes altas y medias del cerro de la Virgen. En este sentido, Buendía-Espinoza et al. (2022) recomiendan transitar del aprovechamiento silvestre hacia sistemas agroforestales que permitan aplicar prácticas de selección, propagación y monitoreo constante de los árboles productores, con el fin de maximizar la producción de resina y conservar el bosque tropical caducifolio. Sin embargo, no es nada fácil su implementación ya que esta área tiene una tenencia comunal, donde su uso es de todos y de nadie a la vez, por lo que no hay propiedad privada y nadie se hace responsable, solamente se realizan aprovechamientos y se deja a la propia naturaleza del ecosistema su regeneración y conservación.

Literatura citada

Abad-Fitz, I., Maldonado-Almanza, B., Aguilar, D. K. M., Sánchez, M. L., Gómez, C. L., Casas, A., Blancas, J., García-Rodríguez, Y. M., Beltrán-Rodríguez, L., Sierra-Huelsz, J. A., Cristianos, S., Moreno, C. A. I., Torres, G. I., & Espinosa-García, F. J. (2020). Consequences of Traditional Management in the Production and Quality of Copal Resin (*Bursera bipinnata* (Moc. & Sessé ex DC.) Engl.) in México. *Forests, 11*(9), 1-24. https://doi.org/10.3390/f11090991

Buendía-Espinoza, J. C., Martínez-Ochoa, E. del C., García-Núñez, R. M., Arrazate-Jiménez, S. del C., y Sánchez-Vélez, A. (2022). Prediction of Resin Production in Copal Trees (Bursera spp.) Using a Random Forest Model. *Sustainability*, 14(13), 8047. https://doi.org/10.3390/su14138047

Cruz, L. A., Salazar, M. L., y Campos, O. M. (2006). Antecedentes y actualidad del aprovechamiento de copal en la sierra de Huautla, Morelos. *Revista de Geografía Agrícola*, (37), 97-115.

Franceschi, V. R., Krokene, P., Cristiansen, E. y Krekling, T. (2005). Anatomical and chemical defenses of conifer bark against bark beetles and other pests. *New Phytologist*, *167*, 353-376. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01436.x

García-Núñez, R. M., Buendía-Espinoza, J. C., Arrazate-Jiménez, S. del C., y Martínez-Ochoa, E. del C. (2023). Effects of copal resin extraction on the diversity and

composition of species in tropical deciduous forests. *Scientific Reports*, 13, 4199. https://doi.org/10.1038/s41598-023-31423-z

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México [INEGI]. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Puebla. Puebla: INEGI.

Linares, E., y Bye, R. (2008). El copal en México. *Biodiversitas,* (78), 8-11.

Mondragón-Barrera, M. A. (2014). Uso de la Correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia. Movimiento Científico. 28(1), 98–104.

Montúfar, L. A. (2016). Copal de Bursera bipinnata. Una resina mesoamericana de uso ritual. *Travaux Recherches dans les Amériques du Centre*, (70), 45-77.

Palermo, F. H., Rodrigues, M. I. A., de Nicolai, J., Machado, S. R., y Rodrigues, T. M. (2018). Resin secretory canals in Protium heptaphyllum (Aubl.) Marchand (Burseraceae): a tridimensional branched and anastomosed system. *Protoplasma*, 255, 1425-1442. https://doi.org/10.1007/s00709-017-1197-6

Purata, V. S. E. (2008). Bases para el buen manejo. En S. E. Purata Velarde (Ed.), Uso y manejo de los copales aromáticos: resinas y aceites (27-35). México: CONABIO/RAISES.

Reyes-Ramos, A., Cruz de León, J., Martínez,-Palacios, A., Marc, L. P. C., Ambriz-Parra, E., & Sánchez-Vargas, N. M. (2019). Caracteres ecológicos y dendrométricos que influyen en la producción de resina en *Pinus oocarpa* de Michoacán, México. *Madera y Bosques, 25*(1), 1-13. DOI: 0.21829/myb.2019.2511414

Rzedowski, J., & Calderón de Rzedowski, G. (2013). Datos para la apreciación de la flora fanerogámica del bosque tropical caducifolio de México. *Acta Botánica Mexicana,* (102), 1-23. doi:10.21829/abm102.2013.229

Tapia-Tapia, E. C. y Reyes-Chilpa, R. (2008). Productos forestales no maderables en México: Aspectos económicos para el desarrollo sustentable. *Madera y bosques, 14*(3), 95-112.

Evaluación del desarrollo vegetativo de *Capsicum annuum* L. bajo la influencia de té de vermicompost y rizobacterias

Ivan Cabanzo-Atilano[28], Manuel Sandoval-Villa, María Guadalupe Peralta-Sanchez, Libia Iris Trejo-Tellez

Resumen

El vigor vegetativo en chile es determinante fisiológico y productivo del cultivo. El uso de biofertilizantes es clave para la producción sostenible de hortalizas. La combinación de té de vermicompost (TVC) y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV) optimiza la nutrición vegetal y productividad agrícola. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta de TVC y RPCV sobre el desarrollo vegetativo de chile bajo invernadero. El experimento se realizó en el Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Se emplearon semillas de chile jalapeño var. jalapeño M, en almácigos con la mezcla 5:3 (v/v) de promix® (turba + perlita) y perlita, establecidas bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial 3×3. Los factores fueron: solución nutritiva (Steiner, TVC y Steiner + TVC) y cepas de RPCV (sin RPCV, *Pseudomonas tolaasii* A46 y *Bacillus licheniformis* JP13). A los 77 días después de siembra se llevó a cabo el muestreo. De acuerdo con los resultados, la combinación Steiner + A46 incrementó el número de hojas. La inoculación de A46 y JP13 incrementaron la altura de planta. Los resultados indican que se podría considerar un enfoque sinérgico de nutrición entre fuentes inorgánicas y orgánicas con la inoculación de RPCV como una estrategia para reducir la huella del uso de fertilizantes inorgánicos y mejorar el crecimiento vegetativo y productividad sostenible de chile bajo invernadero.

Palabras clave: microorganismos benéficos, nutrición vegetal, sostenibilidad, productividad.

Abstract

Vegetative vigor in chili pepper is a key physiological and productive determinant of the crop. The use of biofertilizers is crucial for sustainable vegetable production. The combination of vermicompost tea (VCT) and plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) optimizes plant nutrition and agricultural productivity. Therefore, the objective of this study was to evaluate the response of VCT and PGPR on vegetative development of chili under

[28] Postgrado en Edafología, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco, km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, 56264, ivan.cabanzo@gmail.com, msandoval@colpos.mx, mgperalta@colpos.mx, tlibia@colpos.mx

greenhouse conditions. The experiment was conducted at the Colegio de Postgraduados, campus Montecillo. Pepper jalapeño seeds var. jalapeño M, were sown in seedbeds with a 5:3 (v/v) mixture of promix® (peat moss + perlite) and perlite, established in a completely randomized design with a 3×3 factorial arrangement. The factors were the nutrient solution: Steiner, VCT, and Steiner + VCT,) and PGPR strains (without PGPR, *Pseudomonas tolaasii* A46, and *Bacillus licheniformis* JP13). The variables were evaluated 77 days after sowing. According to the results, the Steiner + A46 combination increased the number of leaves. Inoculation with A46 and JP13 increased plant height. The results indicated that a synergistic nutritional approach combining inorganic and organic sources with the inoculation of plant growth-promoting rhizobacteria could be considered a strategy to reduce the footprint of inorganic fertilizer use and improve vegetative growth and sustainable productivity of chili pepper under greenhouse.

Keywords: beneficial microorganisms, plant nutrition, sustainability, productivity.

Introducción

Una de las etapas determinantes en el ciclo productivo del chile (*Capsicum annuum* L.) es el desarrollo vegetativo (Tripodi y Kumar, 2019). Durante esta etapa se desarrollan los órganos para la captura de radiación, absorción de agua y nutrimentos, regulados por la fisiología vegetal y la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Taiz *et al*., 2023). El vigor vegetativo refleja la eficiencia fisiológica desde la germinación hasta el inicio de la diferenciación floral del cultivo, condicionados por la interacción entre el potencial genético y factores ambientales (Cabanzo-Atilano *et al*., 2020; Camacho-Rodríguez *et al*., 2022; Lambers y Oliveira, 2019).

Durante el desarrollo vegetativo de plantas, los macro y micronutrientes tienen funciones específicas. El N está relacionado con el crecimiento vegetativo, por formar parte de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos y clorofila. El fósforo (P) participa en la transferencia de energía mediante ATP, y estimula el desarrollo radical, mientras que el potasio (K) regula el balance osmótico, la apertura estomática y el transporte de fotoasimilados. Asimismo, el resto de los macronutrientes y micronutrientes participan en distintos procesos metabólicos relacionados con la estabilidad de membranas, síntesis de clorofila, actividad enzimática y crecimiento celular (Kutman, 2023; Salazar-Jara *et al*., 2016; Taiz *et al*., 2023). Por ello, la nutrición adecuada y equilibrada del chile es importante para asegurar la productividad (Salazar-Jara *et al*., 2016).

El empleo de nutrición orgánica es una alternativa sostenible para complementar o sustituir parcialmente la nutrición inorgánica (Abebe *et al*., 2022; Lim *et al*., 2016). Materiales como

la composta, vermicompost, lixiviado y té de compost, aportan nutrimentos de liberación gradual, incrementan el contenido de materia orgánica y mejoran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Abdel-Lattif y Abbas, 2025; Acevedo-Alcalá *et al*., 2020; Bala, 2022; Lim *et al*., 2016). El uso de microorganismos en la agricultura sostenible, principalmente las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (RPCV), han incrementado la productividad de chile (Cabanzo-Atilano *et al*., 2020; Camacho-Rodríguez *et al*., 2022; Gogoi *et al*., 2026; González-Mancilla *et al*., 2017), mediante mecanismos como la solubilización de P, secreción de sideróforos, síntesis de fitohormonas (auxinas, giberelinas y citocininas), y compuestos orgánicos volátiles (Bala, 2022; Ghosh *et al*., 2024; González-Mancilla *et al*., 2017).

El uso combinado de fuentes orgánicas de nutrición con RPCV tiene efectos sinérgicos sobre el desarrollo vegetal de plantas de chile. La materia orgánica proporciona las condiciones para la colonización y supervivencia de las RPCV, mientras estos incrementan la biodisponibilidad de los nutrientes orgánicos para beneficio de la planta (Cabanzo-Atilano *et al*., 2020; Gogoi *et al*., 2026). En conjunto, estas estrategias permiten optimizar el crecimiento vegetativo del cultivo, aumentar la productividad de forma sostenible (Camacho-Rodríguez *et al*., 2022).

Por consiguiente, para este trabajo se planteó la hipótesis de que la aplicación sinérgica entre fuente nutrimental orgánica con rizobacterias estimula el crecimiento vegetativo de las plántulas de chile, y con el objetivo de evaluar la respuesta de té de vermicompost con rizobacterias sobre el desarrollo vegetativo de chile bajo invernadero.

Materiales y métodos

Durante los meses de noviembre de 2025 a enero 2026, se llevó a cabo el experimento en un invernadero del Área de Nutrición Vegetal del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, México. Se emplearon semillas de chile jalapeño var. Jalapeño M, en almácigos semilleros con sustrato de la mezcla 5:3 (v/v) de promix® (turba + perlita) y perlita. El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial 3×3, como factores fueron la solución nutritiva (SN); solución nutritiva Steiner, té de vermicompost (TVC) y solución nutritiva Steiner + TVC. Como segundo factor fue la inoculación de cepas RPCV; la cepa A46 (*Pseudomonas tolaasii*), y la cepa JP13 (*Bacillus licheniformis*), pertenecientes a la colección microbiana de Microbiología de Suelos del Postgrado en Edafología del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, México. Se cultivaron en caldo nutritivo en agitación por tres días. Para los tratamientos sin RPCV (Testigo) se le aplicó solo caldo nutritivo estéril. Se aplicaron 2 mL asegurando la concentración aproximada de 10^8 células mL^{-1}. La unidad experimental consistió de una

plántula de chile. El riego de los almácigos semilleros se realizó con agua hasta la emergencia, posteriormente se irrigó con las soluciones nutritivas correspondientes, con una CE referencia que aumentó paulatinamente de 0.5 a 1 dS m^{-1}.

A los 77 días después de siembra se realizó la evaluación de lecturas atLeaf, altura de plántula (cm) y número de hojas. Los datos obtenidos fueron sometidos a prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (α=0.05) y la prueba de Levene para homogeneidad de varianza. Posteriormente, se realizaron análisis de varianza factorial y la prueba DHS de Tukey (α = 0.05) o un análisis no paramétrico con el método de rango alineado transformado (ART, por sus siglas en inglés) y prueba de post-hoc, de acuerdo con Rodríguez (2021), todos los análisis realizados con el programa estadístico libre R.

Resultados y discusión

Con la prueba no paramétrica de ART, se encontró una interacción significativa entre los factores sobre las lecturas atLeaf (p = 0.0028), pero al realizar la prueba post-hoc, no se detectaron diferencias significativas, aun cuando el rango medio mayor fue de 59.2 con el Tratamiento Steiner + TVC sin RPCV, y el rango medio menor fue de 26.1 con Steiner + TVC con A46, sin embargo, los tratamientos Steiner +TVC: sin RPCV y Steiner: A46, mostraron valores nominales superiores (6.6 y 6 %, respectivamente) con respecto a Steiner: sin RPCV, mientras que, el Tratamiento Steiner + RPCV: A46 presentó un valor nominal inferior del 9.8 %, respecto a Steiner: RPCV.

En número de hojas de acuerdo al análisis de varianza factorial, hubo diferencias estadísticamente significativas con la interacción de los factores (p = 0.0001), donde el tratamiento Steiner: A46 (2.5) superó 6.5 % al tratamiento Steiner: sin RPCV (2.3) de acuerdo a DHS de Tukey. Mientras que, en altura de plántula no se detectaron diferencias significativas en la interacción de factores (p = 0.1558, Figura 1), pero se registraron diferencias significativas con el efecto principal de solución nutritiva (p = <0.0001) y RPCV (p = 0.0217). La mayor altura se alcanzó con la aplicación de Steiner y la combinación de Seiner + TVC, los cuales superaron a TVC en 24 %. La inoculación de la cepa A46 estimulo mayor altura, hasta 13.2 % con respecto a sin inocular RPCV (11.9 cm).



Figura 1. Plántulas de chile con distintos fuentes nutritivas e inoculación de rizobacterias.

El manejo agronómico desde almacigo, así como la adecuada disponibilidad de nutrientes, condicionan la productividad y calidad del desarrollo vegetativo de plántulas de chile (Cabanzo-Atilano *et al*., 2020; Camacho-Rodríguez *et al*., 2022). Tal como se observó en este trabajo al suministrar la solución nutritiva Steiner, ya que aporta equilibradamente macro y micronutrientes, que se refleja en la altura de planta y número de hojas reflejan el estado funcional de la planta y responden directamente al manejo nutricional (Taiz *et al*., 2023). Lo anterior mejora la nutrición, el equilibrio hormonal con la actividad fotosintética, favorecen el desarrollo vegetativo de chile (Mohunnad y Laszlo, 2021).

Desde el punto de vista fisiológico, un mayor número de hojas representa mayor capacidad para producir fotoasimilados, porque los carbohidratos favorecen el crecimiento de tallos y órganos celulares, además de optimizar la productividad del cultivo (Lambers y Oliveira, 2019), y en este estudio la nutrición equilibrada con Steiner indujo mayor número de hojas. El incremento en altura de planta, observada con la inoculación de A46, puede atribuirse a diversos mecanismos fisiológicos que incrementan la disponibilidad y absorción nutrimental, como la solubilización de fosfatos, además de la capacidad de las RPCV de producir fitohormonas, principalmente ácido indolacético (AIA), giberelinas y citocininas, las cuales estimulan la división y elongación celular, que promueven el crecimiento vegetativo (Bala, 2022; Ghosh *et al*., 2024). Los resultados concuerdan con los reportados en chile jalapeño por González-Mancilla *et al*. (2017) quienes observaron que la inoculación con *Serratia plymuthica* CPPC55 incrementó 15 % la altura, asociada a la mayor producción de fitohormonas y absorción de nutrientes. Asimismo, la inoculación de *S. liquefaciens* incrementó 17 % la altura y *S. plymuthica* aumentó 10 % el número de hojas,

respecto al Testigo en plántulas de chile jalapeño en condiciones de semillero (Camacho-Rodríguez *et al*., 2022).

El comportamiento similar en crecimiento entre Steiner y la combinación Steiner: TVC, y en lecturas atLeaf con las distintas fuentes nutrimentales, independientemente de la inoculación de RPCV, podría explicarse por el suministro complementario de nutrimentos provenientes tanto de fertilizantes inorgánicos como de fuentes orgánicas, ya que las fuentes orgánicas liberan nutrientes de forma gradual mediante procesos de mineralización, además de aumentar la colonización y actividad de microorganismos, para favorecer el desarrollo vegetativo (Lim *et al*., 2016; Mohunnad y Laszlo, 2021).

Conclusiones

Los resultados indicaron que se puede considerar un enfoque sinérgico de nutrición entre fuentes inorgánicas y orgánicas con la inoculación de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal como una estrategia para reducir la huella de fertilizantes inorgánicos y mejorar el crecimiento vegetativo y productividad sostenible de chile bajo invernadero.

Literatura citada

Abdel-Lattif, H. and Abbas, M. (2025). Influence of partial vermicompost tea substitution for mineral nitrogen fertilizers on yield and nutrient content of wheat cultivars. *Crops*. 5(4): 51. https://doi.org/10.3390/crops5040051

Abebe, T. G., Tamtam, M. R., Abebe, A. A., Abtemariam, K. A., Shigut, T. G., Dejen, Y. A., Haile, E. G. (2022). Growing, use and impacts of chemical fertilizers and assessing alternative organic fertilizer sources in Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science*. 2022(1): 4738416. https://doi.org/10.1155/2022/4738416

Acevedo-Alcalá, P., Cruz-Hernández, J., Taboada-Gaytán, O. R. (2020). Abonos orgánicos comerciales, estiércoles locales y fertilización química en la producción de plántula de chile poblano. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 43(1), 35-44. https://doi.org/10.35196/rfm.2020.1.35

Bala, K. (2022). Microbial fertilizer as an alternative to chemical fertilizer in modern agriculture. In: R. Prasad and S.-H. Zhang (eds.), *Beneficial microorganisms in agriculture*. Springer Nature Singapore. pp. 111-130. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0733-3_4

Cabanzo-Atilano, I., Rodríguez-Mendoza, M. N., García-Cué, J. L., Almaraz-Suárez, J. J., Gutiérrez-Castorena, M. C. (2020). La biofertilización y nutrición en el desarrollo de

plántulas de chile serrano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 11(4): 699-712. https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2121

Camacho-Rodríguez, M., Almaraz-Suárez, J. J., Vázquez-Vázquez, C., Angulo-Castro, A., Ríos-Vega, M. E., González-Mancilla, A. (2022). Efecto de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal en el desarrollo y rendimiento del chile jalapeño. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 13(28): 185-196. https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3273

Ghosh, A., Acharya, R., Shaw, S., Gangopadhyay, D. (2024). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): A potential alternative tool for sustainable agriculture. *In*: M. Gull (ed.), *Updates on rhizobacteria*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.1004252

Gogoi, P., Ali, A., Sarkar, A., Bharali, P., Saikia, R. (2026). Rhizobacteria induced systemic resistance in *Capsicum* spp.: Strategies to improve biotic stress tolerance. *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 142: 103087. https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.103087

González-Mancilla, A., Almaraz-Suárez, J. J., Ferrera-Cerrato, R., Rodríguez-Guzmán, M. D. P., Taboada-Gaytán, O. R., Trinidad-Santos, A., Alarcón, A., Arteaga-Garibay, R. I. (2017). Caracterización y selección de rizobacterias promotoras de crecimiento en plántulas de chile poblano (*Capsicum annuum* L.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 33(3), 463-474. https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.03.09

Kutman, U. B. (2023). Mineral nutrition and crop quality. *In*: Z. Rengel, I. Cakmak, P. J. White (eds.), *Marschner's mineral nutrition of higher plants* 4th edition. Academic Press-Elsevier. pp. 419-444. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819773-8.00020-4

Lambers, H. and Oliveira, R. S. (2019). *Plant Physiological Ecology* (3rd ed.). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29639-1

Lim, S. L., Lee, L. H., Wu, T. Y. (2016). Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: Recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production, Special Volume: Process Integration for Cleaner Production*. 111: 262-278. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.083

Mohunnad, M. and Laszlo, R. (2021). The action of nutrients deficiency on growth biometrics, physiological traits, production indicators, and disease development in pepper (*Capsicum annuum* L.) plant: A review. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture.* 15(3): 1-19. https://doi.org/10.22587/aejsa.2021.15.3.1

Rodríguez, A. R. M. (2021). Métodos alternativos ante la violación de supuestos en diseños de experimentos factoriales. *Anales Científicos*. 82(2), 318-335. https://doi.org/10.21704/ac.v82i2.1795

Salazar-Jara, F. I., Juárez-López, P., Bugarín-Montoya, R., Alejo-Santiago, G., García-Paredes, J. D., Cruz-Crespo, E. (2016). Extraction of macronutrients in chile (*Capsicum annuum* L.) Hungarian type. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 7(8), 2055-2061.

Taiz, L., Møller, I. M., Murphy, A., Zeiger, E. (2023). *Plant physiology and development* (7a. ed.). Sinauer Associates, 752 p.

Tripodi, P. and Kumar, S. (2019). The capsicum crop: An introduction. In: N. Ramchiary and C. Kole (eds.), *The Capsicum genome*. Springer International Publishing. pp. 1-8. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97217-6_1

Diversidad fúngica de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan

María Sol Robledo y Monterrubio[29], Higinio Francisco Arias Velázquez[30], Silvia Bautista Hernández, Isaac Ramírez Barraza[31]

Resumen

La diversidad fúngica constituye un componente fundamental de los ecosistemas forestales por su participación como descomponedores, organismos simbiontes y parásitos. Sin embargo, factores como el cambio climático, la fragmentación del hábitat, el cambio de uso de suelo y la contaminación representan amenazas para la conservación de esta biodiversidad. El presente trabajo tuvo como objetivo contribuir al conocimiento de la micobiota de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), Estado de México, mediante el inventario y determinación taxonómica de macromicetos, así como identificar sus principales usos e iniciar una colección de ejemplares en la Universidad Autónoma Chapingo. Se realizaron tres exploraciones micológicas durante septiembre y octubre de 2019 y junio de 2022. Los ejemplares fueron recolectados, fotografiados, descritos en fresco, desecados e identificados mediante claves taxonómicas y bibliografía especializada; posteriormente, el material fue depositado en la colección de hongos del Departamento de Preparatoria Agrícola. Hasta el momento se determinaron aproximadamente 29 especies, pertenecientes principalmente a Basidiomycota y Ascomycota, además de especies de Myxomycota. Se registraron especies humícolas, terrícolas, lignícolas y fitoparásitas, con diversidad de usos, incluyendo especies comestibles, tóxicas, venenosas y micorrícicas. Destaca el primer registro de *Reticularia lycoperdon* para la zona y la presencia de *Cronartium conigenum*, fitoparásito con potencial para afectar los bosques de oyamel. Se concluye que la EFEZ posee una importante riqueza fúngica y que es necesario continuar las recolectas y estudios taxonómicos para complementar el conocimiento de su micobiota y contribuir a su conservación.

Palabras clave: hongo, micobiota, funga, basidioma, ascoma

Abstract

Station (EFEZ), State of Mexico, through the inventory and taxonomic identification of macromycetes, as well as to identify their main uses and initiate a fungal collection at the

[29] Universidad Autónoma Chapingo. Centro de Investigación en Biología, Educación Ambiental y Agricultura Orgánica. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO. mrobledoym@yahoo.com.mx HARIASV@chapingo.mx
[30] Colección de hongos, Herbario Nacional de México, IBUNAM. silvia.bautista@ib.unam.mx
[31] División de Ciencias Forestales

Universidad Autónoma Chapingo. Three mycological surveys were conducted in September and October 2019 and June 2022. Specimens were collected, photographed, described in fresh condition, dried, and taxonomically identified using specialized identification keys and literature. The collected material was subsequently deposited in the fungal collection of the Department of Agricultural Preparatory Studies. Approximately 29 species have been identified to date, belonging mainly to Basidiomycota and Ascomycota, in addition to species of Myxomycota. Humicolous, terricolous, lignicolous, and phytoparasitic species were recorded, with diverse uses including edible, toxic, poisonous, and mycorrhizal species. Notably, Reticularia (Enteridium) lycoperdon was recorded for the first time in the area, while Cronartium conigenum, a phytoparasite with the potential to affect fir forests, was also identified. It is concluded that the EFEZ has significant fungal richness and that continued

Keywords: Fungus, mycobiota, funga, basidioma, ascocarp.

Introducción

Los hongos son un grupo extremadamente diverso, que se encuentra en casi todo el mundo y presentando múltiples modos de vida: descomponedores, parásitos o mutualistas. Lo que comúnmente se asocia a ellos son los esporóforos, que son solo una estructura temporal con función reproductiva y que portan esporas de origen sexual. No obstante, esta estructura representa solamente el 10% de estos organismos, y la mayor parte de los hongos se presenta en forma de hifas, en forma de redes de filamentos blanquecinos, las cuales se encargan de las demás funciones. Estas hifas están formadas por células bastante rígidas, las cuales presentan una pared celular, compuesta por quitina.

Dicha solidez permite una estabilidad estructural, pero no protege de la depredación por parte de los animales. La estrategia que los hongos han usado para evitar ser comidos es esconderse, para lo cual se adentran en los sustratos donde crecen, insertos dentro del suelo, la madera, la fruta podrida u otros entornos. Otra estrategia de vida común es la vida libre, como en el caso de las levaduras, cuyas células nucleadas se encuentran libremente en el entorno. Ya sea uno o el otro, los hongos presentan increíbles soluciones al problema de sobrevivir y reproducirse. Los principales grupos que presentan esporomas pertenecen al phylum Ascomycota y son llamados Ascomas, así como también los más populares son los del Phylum Basidiomycota formando Basidiomas en donde encontramos a las llamadas comúnmente setas.

Los hongos son heterótrofos, que significa que, a diferencia de las plantas, deben buscar su alimento en el entorno, pues no pueden producir su propio sustento. Esto concuerda con la

evidencia genética que emparenta a los hongos con los animales (dentro de un grupo llamado Ophistokonta, que también incluye algunos tipos de amebas) (Torruela et al, 2015). Esto representa el principal desafío para los hongos, especialmente considerando su baja movilidad, por lo que muchos se han especializado en alimentarse de material orgánico en descomposición o en generar relaciones de cooperación tremendamente complejas. El alimento de los hongos descomponedores no puede huir, pero esto no los evade de otros singulares desafíos. Las estructuras más simples y digeribles de los organismos en descomposición suelen ser consumidas por los animales, por lo que lo disponible para los hongos suelen ser las partes más complejas de tratar. Nuevamente, los hongos han logrado superar este desafío y presentan increíbles maquinarias bioquímicas que les permiten disgregar moléculas de increíble complejidad. Un buen ejemplo de esto es la lignina, un polímero de azúcares que forma la parte más rígida de las plantas, la madera. Esta molécula es extremadamente estable, pero muchos hongos han generado mecanismos para digerirla. Tanto así que incluso existe una categoría para llamarlos: los hongos Xilófagos (Comedores de madera). Este proceso es importantísimo a nivel ecosistémico, pues gran parte de la energía y materia del sistema está encapsulada en este tipo de estructuras muertas, las cuales los descomponedores, muchos de ellos hongos, son capaces de digerir y por ende volver a integrar esta energía en los ciclos de los seres vivos. Esta misma maquinaria metabólica y complejidad bioquímica hace que los hongos sean especialmente buenos aliados para otros organismos, especialmente los fotosintéticos. Estos últimos deben invertir gran parte de sus recursos en la generación de los mecanismos para la fotosíntesis, impidiendo la inversión en otros ámbitos, como la maquinaria bioquímica y la resistencia a las condiciones ambientales. Los hongos en cambio pueden presentar un gran desarrollo en estas otras áreas y al carecer de mecanismos eficientes para la captación de alimento, resulta sencillo entender por qué se han formado asociaciones simbióticas entre estos dos estilos de vida.

El estudio taxonómico de la diversidad fúngica es de suma importancia para establecer los servicios que como recurso forestal proporciona tanto al ambiente como al humano. Hawksworth y Lücking (2017), mencionan que en el mundo existen entre 2.2 a 3.8 millones de especies de hongos, de las cuales para México se estiman entre 120 y 200,000; de acuerdo con Aguirre-Acosta et al. (2014) se han registrado un total de 4,500 especies de macromicetos y 2,000 de micromicetos para México, lo que representa entre un 3.2 % de especies conocidas para nuestro país. Por lo que México es considerado como uno de los países con mayor diversidad fúngica (Alcántar et al., 2022). Para el estado de México se registran 726 (Frutis y Valenzuela, 2009) y existen trabajos sobre la micobiota de importancia comestible en la región de Zoquiapan y el PARQUE nacional Izta-Popo (Pérez-Moreno et al., 2009). Sin embargo, debido al cambio climático, fragmentación de sus hábitats, cambio de uso de suelo,

y contaminación esta biodiversidad se ha visto amenazada, por lo que es de suma importancia realizar inventarios actuales de las especies fúngicas que se encuentran en nuestro país.
Para el Estado de México se registran 726 (Frutis y Valenzuela, 2009) y existen trabajos sobre la micobiota de importancia comestible en la región de Zoquiapan y el PARQUE nacional Izta-Popo (Pérez-Moreno et al., 2009), hace varios años Estrada et al publicaron un pequeño manual de la Estación Forestal Zoquiapan donde incluyen 40 especies de macrohongos, desafortunadamente no cuenta con fecha de publicación.

Sin embargo, debido al cambio climático, fragmentación de sus hábitats, cambio de uso de suelo, y contaminación esta biodiversidad fúngica se ha visto amenazada, por lo que es de suma importancia realizar inventarios actuales de las especies de macromicetos que se encuentran en nuestro país y en particular de la micobiota de la Estación Forestal Zoquiapan Parque Nacional Zoquiapan, Edo. de México.

Área de estudio. El Parque Nacional Izta-Popo, Zoquiapan se encuentra ubicado en la parte central de la Sierra Nevada, entre las coordenadas 18°59’ y 19°16’25”de Latitud N y 98°34’54” y 98°16’25”de Longitud W., en el municipio de Ixtapaluca, Estado de México. Presenta bosques de Pino (Pinus spp.), Encino (Quercus spp.) y Oyamel (Abies religiosa); en ella se ubica la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ) de la División de Ciencias Forestales (DICIFO) de la Universidad Autónoma Chapingo, a 19° 12' 30" y 19° 20' 00" N, 98° 30' 00" y 98° 42' 30" O, con una superficie de 1,636 hectáreas, y altitudes que van de los 3,080 a 3,690 msnm. Se ubica en los límites del Estado de México y Puebla, en la porción norte del Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatépetl-Zoquiapan (PNIPZ).
Por lo anteriormente expuesto, el actualizar el conocimiento de las especies de macromicetos, sus usos y aprovechamiento será una herramienta útil para los científicos interesados en los hongos, los colectores y comunidad aledaña al lugar de la Estación Forestal Zoquiapan, así como también se conocerá el patrimonio biológico y cultural de la funga en México y en particular de la UACh. Objetivos

1) Contribuir al conocimiento de la micobiota de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, Edo. de México.
2) Realizar un inventario de nombres científicos y comunes de hongos comestibles, venenosos y tóxicos que se hayan encontrado en las recolectas por medio de la identificación taxonómica de los ejemplares recolectados.

Materiales y métodos

Trabajo de campo. Se realizaron tres exploraciones micológicas en septiembre y Octubre de 2019 y junio de 2022. Los ejemplares se recolectaron de acuerdo con las técnicas usuales

de Micología, se fotografiaron y describieron en fresco, se desecaron y fueron identificados taxonómicamente mediante claves o guías y de bibliografía especializada (Guzmán, & Piepenbring, 2011; Wartchow *et al*., 2008) entre otros (figura 1).



Figura 1. Procesamiento de los macrohongos desde la recolecta, fotografiado, desecado e identificación

El material fue depositado en la colección de hongos del Departamento de Preparatoria Agrícola de acuerdo con las técnicas tradicionales para hongos con base en las obras de Cifuentes *et al*., 2010.

Resultados y discusión

Hasta ahora se han determinado aproximadamente 29 especies, entre ellas cinco pertenecen al Phylum Ascomycota: *Leotia lubrica* (Scop.) Pers.; *Tarzetta catinus* (Holmsk.); *Helvella elastica* Bull.; *Helvella lacunosa* Afzel.; *Otidea onotica* (Pers.); 21 Basidiomycota: *Cronartium conigenum* Hedgc. & N.R.Hunt; *Agaricus xanthodermus* Genev.; *Amanita vaginata* (Bull.) Lam.; *Bovista fusca* Lév.; *Lycoperdon perlatum* Pers.; *Coprinellus micaceus* (Bull.) Vilgalys, Hopple & Jacq. Johnson; *Hypholoma fasciculare* (Huds.) P. Kumm; *Xerocomellus chrysenteron* (Bull.) Šutara; *Cantharellus cibarius* Fr.; *Craterellus cornucopioides* (L.) Pers.; *Trichaptum abietinum* (Pers. ex J.F. Gmel.) Ryvarden; *Russula*

emetica (Schaeff.) Pers.; *Russula olivacea* (Schaeff.) Fr.; *Thelephora terrestris* Ehrh. ex Fr.; *Cryptoporus volvatus* (Peck) Shear; *Fomitopsis pinicola* P.Karst; *Guepinia helvelloides* (DC.) Fr.; *Exidia glandulosa* (Bull.) Fr.; *Geastrum pectinatum* Pers.; *Geastrum triplex* Jungh. y *Sphaerobolus stellatus* Tode; por último tres son Amebozoa (Myxomycota): *Lycogala epidendrum* (J.C. Buxb. ex L.) Fr.; *Reticularia (Enteridium) lycoperdon* Bull. y *Hemitrichia calyculata* (Speg.) M.L. Farr. Se describen sus características distintivas y de ellas, 10 especies son humícolas, 16 se desarrollan en suelo (terrícolas), 11 lignícolas y 1 fitoparásito. En cuanto a usos 11 son comestibles, 5 tóxicos, dos venenosos y diez comestibles. Es necesario continuar con recolectas para complementar la diversidad fúngica de esta zona. Se comenta la descripción de cada especie.

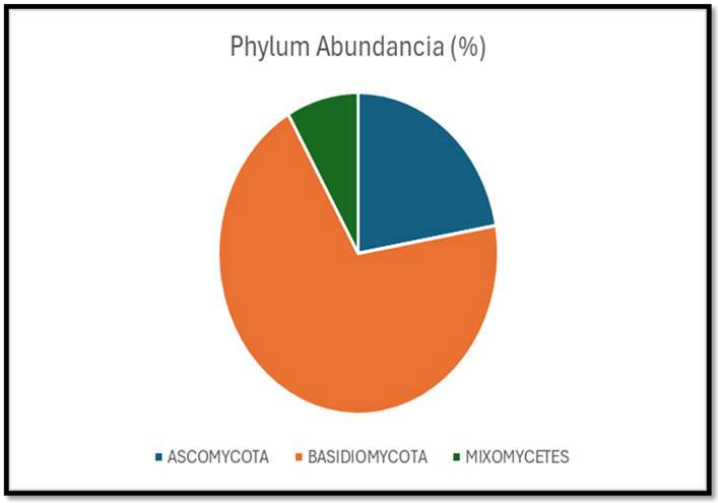


Figura 2. Abundancia (%) de especies determinadas para cada Phylum.

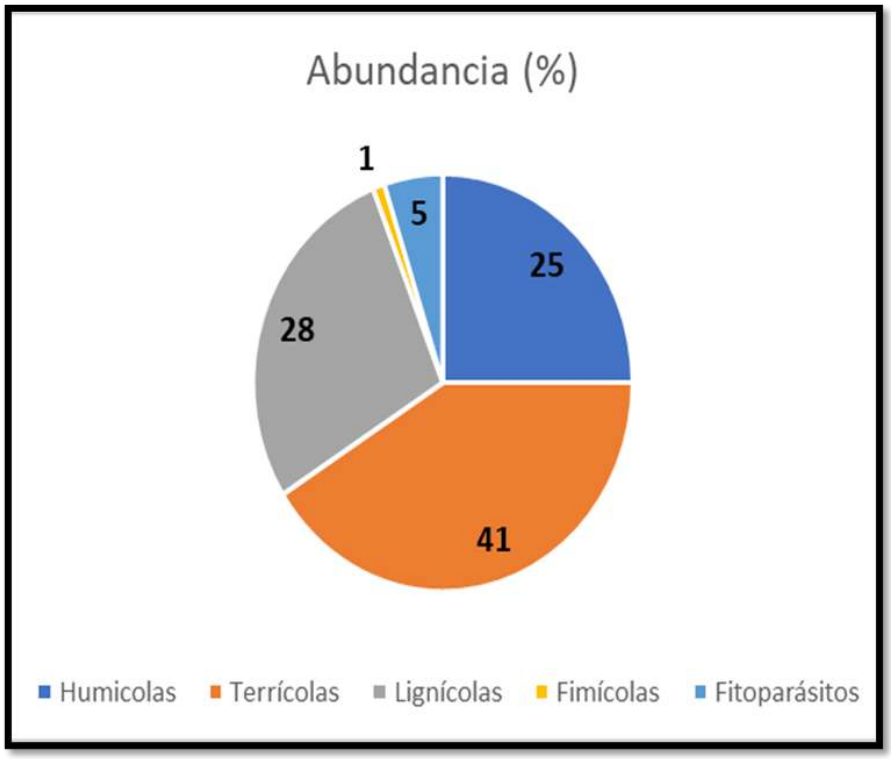


Figura 3. Abundancia de las especies encontradas de macromicetos en la EFEZ en diferentes substratos



Geastrum triplex



Geastrum pectinatum



Geastrum saccatum

Figura 4. Diversidad de algunos Gasteromicetos de la EFEZ



Figura 5. Hongos comestibles encontrados en la EFEZ.



Figura 6. Hongos Fitoparásitos. Ascomycota Hypocreales: *Nectria cinabarina* que ocasiona el chancro de los árboles y Basidiomycota Pucciniales que es la roya agalladora de los conos de Pino *Cronartium conigenum*



Figura 7. Especies determinadas de hongos gelatinosos**.**



Figura 8. Diversidad fúngica encontrada en la EFEZ

Conclusiones

La diversidad de la micobiota encontrada en el Parque Nacional de Zoquiapan, y en particular en la EFEZ, nos arroja riqueza de especies en todos los ambientes, así como también de sus usos. Se encontraron 10 especies humícolas, 16 se desarrollan en suelo (terrícolas), 11 lignícolas y 2 fitoparásitos. En cuanto a usos 11 son comestibles, 5 tóxicos, dos venenosos y diez micorrícicos. Se registra por primera vez en la zona a *Reticularia (Enteridium) lycoperdon* Bull.

Cronartium conigenum es una roya potencial que destruye los bosques de oyamel por lo que es urgente establecer programas fitosanitarios para el control de este fitoparásito.
Es necesario continuar con recolectas para complementar la diversidad fúngica de esta zona ya que se ha registrado una diversidad muy relevante en la EFEZ considerándolo una riqueza invaluable de la funga de bosques templados en el Estado de México.

Literatura citada

Alcántar, O. R., Herrera-Fonseca, M. D. J., & Figueroa-García, D. NEW ADDITIONS OF MACROMYCETES FOR MEXICO NUEVAS ADICIONES DE MACROMICETOS PARA MÉXICO. Aguirre-Acosta, E., Ulloa, M., Aguilar, S., Cifuentes, J., & Valenzuela, R. (2014). Biodiversidad de hongos en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, *85*, 76-81.

Aguirre-Acosta, E., Ulloa, M., Aguilar, S., Cifuentes, J., & Valenzuela, R. (2014). Biodiversidad de hongos en México. Revista mexicana de biodiversidad, 85, 76-81.

Cifuentes, J., M. Villegas, L. Pérez-Ramírez, (1986). Hongos. In: Lot, A., F. Chiang (eds.). Manual de herbario. Consejo Nacional de la Flora de México, A.C., México, D.F. pp. 55-64

Estrada-Martínez, E., Ramírez, P. L., Castellanos, P., y Janett, K. Un acercamiento a los macrohongos de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan, Estado de México.

Frutis-Molina, I. y R. Valenzuela. (2009). Macromicetos. In La diversidad biológica del Estado de México. Estudio de estado, G. Ceballos, R. List, G. Garduño, R. López-Cano, M. J. Muñozcano-Quintanar, E. Collado y J. E. San Román (comps.). Gobierno del Estado de México, Biblioteca Mexiquense del Bicentenario, Toluca. p. 243-249.

Guzmán, G. (1998a). Análisis cualitativo y cuantitativo de la diversidad de los hongos en México (Ensayo sobre el inventario fúngico del país). In La diversidad biológica de Iberoamérica II, G. Halffter (ed.). Acta Zoológica Mexicana, nueva serie vol. Especial, CYTED e Instituto de Ecología, Xalapa. p. 111-175. [Links]

Guzmán, G. (1998b). Inventorying the fungi of Mexico. Biodiversity and Conservation 7:369-384. Guzmán, G., & Piepenbring, M. (2011). Los hongos de Panamá: introducción a la identificación de los macroscópicos (p. 150). Xalapa: Instituto de Ecología, AC.

Guzmán, G., & Piepenbring, M. (2011). *Los hongos de Panamá: introducción a la identificación de los macroscópicos* (p. 150). Xalapa: Instituto de Ecología, AC.
Hawksworth, DL y Lücking, R. (2017). Diversidad fúngica revisada: 2,2 a 3,8 millones de especies. *Espectro de microbiología* , *5* (4), 5-4.

Wartchow, F., Putzke, J., & Cavalcanti, M. A. D. Q. (2008). Agaricaceae Fr.(Agaricales, Basidiomycota) from areas of Atlantic Forest in Pernambuco, Brazil. *Acta Botanica Brasilica*, *22*, 287-299.

Diversidad, estructura horizontal y vertical de un bosque templado bajo manejo forestal en Durango, México

Gabriel Graciano-Ávila[32], Benedicto Vargas-Larreta[33], José Encarnación Luján-Soto[34]

Resumen

El manejo forestal transforma los ecosistemas. El presente estudio caracteriza la diversidad, la estructura horizontal y vertical de especies arbóreas en un bosque bajo manejo en Durango, México. La información se obtuvo de 15 sitios permanentes de muestreo de 2500 m^2; se censaron árboles con diámetro a la altura del pecho (DAP > 7.5 cm), registrando especie, DAP y altura. La diversidad se estimó mediante riqueza de especies (*S*), índice de Margalef (D_{Mg}) e índice de Shannon-Weaver (*H´*). La estructura horizontal se evaluó con el Índice de Valor de Importancia (*IVI*) y la vertical con el índice de Pretzsch (*A*), el cual divide la estructura en tres estratos de altura. Se identificaron 21 especies, con dominancia del género *Pinus*. D_{Mg} promedió 0.78 ± 0.32 y *H´* fue de 1.05 ± 1.04. *Pinus teocote* presentó el mayor *IVI* (22.27%) y la distribución diamétrica mostró una forma de "*J* invertida". El índice *A* fue de 2.61, con un valor máximo $A_{máx}$ de 4.14, lo que evidencia una distribución no uniforme en el gradiente vertical. Aunque el bosque exhibe elevada heterogeneidad vertical y la distribución diamétrica garantiza su permanencia en el tiempo, la diversidad biológica resulta baja, dominada por *Pinus teocote*, especie favorecida por el manejo forestal.

Palabras clave: Diversidad alfa, estructura forestal, Índice de Valor de Importancia, *Pinus teocote,* riqueza de especies.

Abstract

Forest management transforms ecosystems. This study characterizes the diversity, horizontal, and vertical structure of tree species in a managed forest in Durango, Mexico. Data were obtained from 15 permanent sampling plots of 2500 m²; trees with diameter at breast height (DBH > 7.5 cm) were surveyed, recording species, DBH, and height. Diversity was estimated using species richness (*S*), Margalef's index (D_{Mg}), and the Shannon-Weaver index (*H´*).

[32] Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto. Tecnológico 101, col. La Forestal. C. P. 34942. El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México. Correo: gabri.e.l@hotmail.com
[33] Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto. Tecnológico 101, col. La Forestal. C. P. 34942. El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México. Correo: bvargas@itelsalto.edu.mx
[34] Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de El Salto. Tecnológico 101, col. La Forestal. C. P. 34942. El Salto, Pueblo Nuevo, Durango, México. Correo: jelujans@gmail.com

Horizontal structure was assessed with the Importance Value Index (*IVI*), and vertical structure with Pretzsch's index (*A*), which divides the stand into three height strata. A total of 21 species were identified, with dominance of the genus *Pinus*. D_{Mg} averaged 0.78±0.32 and *H´* was 1.05±1.04. *Pinus teocote* showed the highest *IVI* (22.27%), and the diameter distribution exhibited an inverted "*J*" shape. The *A* index was 2.61, with a maximum value (A_{max}) of 4.14, evidencing a non-uniform distribution along the vertical gradient. Although the forest displays high vertical heterogeneity and the diameter distribution ensures its long-term persistence, biological diversity is low, dominated by *Pinus teocote*, a species favored by forest management.

Keywords: Alpha diversity, forest structure, Importance Value Index, *Pinus teocote*, species richness.

Introducción

La Sierra Madre Occidental (SMO) constituye una de las cadenas montañosas más extensas y continuas de México, donde los bosques templados están dominados principalmente por especies de los géneros *Pinus* y *Quercus*. El manejo forestal sostenible en estos ecosistemas representa una estrategia fundamental para conservar la biodiversidad y garantizar el aprovechamiento responsable de los recursos naturales. En el contexto nacional, los bosques templados son un recurso esencial tanto para las comunidades rurales como para la conservación de los servicios ecosistémicos (Graciano-Luna et al., 2025a).

La caracterización de la diversidad y la estructura forestal resulta indispensable para comprender la dinámica de los ecosistemas y orientar prácticas silvícolas adecuadas. Estudios recientes en Durango han demostrado que distintos esquemas de manejo, como el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) y el Método de Desarrollo Silvícola (MDS), generan variaciones significativas en la riqueza y diversidad de especies arbóreas, así como en la distribución de parámetros estructurales como abundancia, dominancia y valor de importancia (Graciano-Luna et al., 2025b).

De igual manera, investigaciones sobre especies dominantes como *Pinus teocote* han evidenciado que el manejo forestal influye en su crecimiento, biomasa y capacidad de almacenamiento de carbono, reforzando su papel en la dinámica de los bosques templados (Ríos-Camey et al., 2021). En contraste, se ha documentado que la deforestación y las prácticas de aprovechamiento no sostenibles afectan negativamente el reclutamiento y la diversidad de plántulas, comprometiendo la regeneración natural y la resiliencia de los ecosistemas (Cruz-Salazar et al., 2024).

En este contexto, resulta necesario analizar cómo el manejo forestal aplicado en los bosques templados de Durango impacta la diversidad alfa, la estructura horizontal y vertical, así como la dominancia de especies como *Pinus teocote*. Este tipo de estudios aporta información valiosa para diseñar estrategias de conservación y uso sostenible que aseguren la permanencia de los ecosistemas y el bienestar de las comunidades locales. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es describir la diversidad y la estructura horizontal y vertical de las especies arbóreas en un bosque templado bajo manejo forestal en el noroeste del estado de Durango, México.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en un bosque templado de la Sierra Madre Occidental, en el noroeste del estado de Durango, específicamente entre las coordenadas 25°00′00″–25°12′00″ N y 105°54′00″–105°24′00″ W (Figura 1).

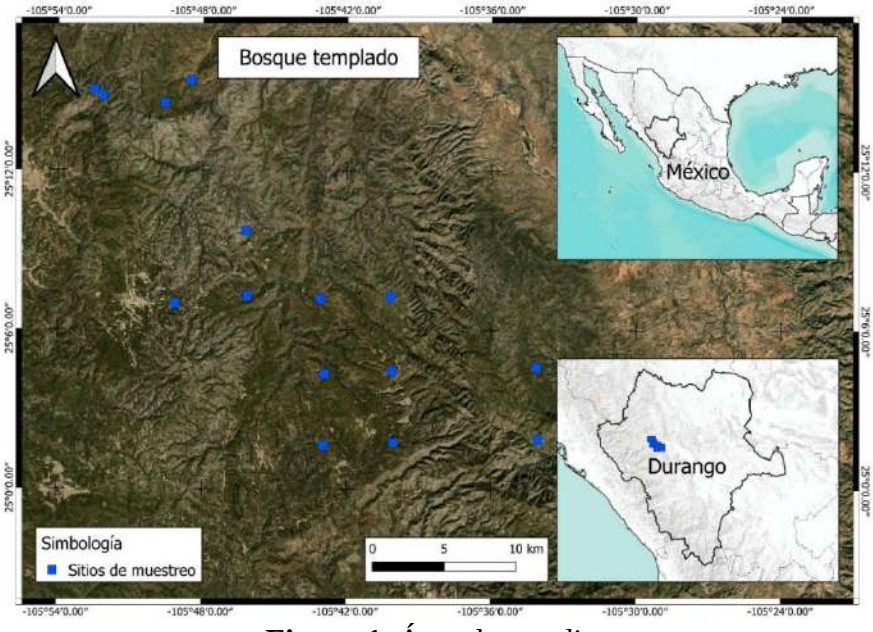


Figura 1. Área de estudio.

Recolección de datos

La información proviene de 15 sitios permanentes de 2500 m^2 (50 × 50 m), establecidos siguiendo la metodología de Corral-Rivas et al. (2009). Se realizó un censo de los árboles a los que se les registraron las variables dasométricas de diámetro normal (cm) y altura total (m), además de la especie correspondiente. Se consideraron únicamente individuos con diámetro normal (DAP a 1.30 m de altura) ≥ 7.5 cm.

Análisis de datos

La riqueza de especies se estimó mediante el índice de Margalef (Margalef, 1958), calculado con la Ecuación (1). La diversidad se evaluó con el índice de Shannon-Weaver (Shannon & Weaver, 1949), expresado en la Ecuación (2), que considera la proporción de individuos de cada especie respecto al total.
Índice de Margalef:

$$D_{Mg} = \frac{S-1}{LnN} \quad (1)$$

Donde: D_{Mg} es el índice de Margalef, S el número total de especies registradas y N el número total de individuos muestreados.
Índice de Shannon-Weaver:

$$H` = -\sum_{i=1}^{S} P_i \ x \ ln(P_i) \qquad P_i = \frac{P_i}{N} \quad (2)$$

Donde: H' es el índice de Shannon-Weaver, P_i la proporción de individuos de la especie i, N_i el número de individuos de la especie i y N el número total de individuos.

Para describir la estructura horizontal se calcularon la abundancia (A_i), la dominancia (D_i) y la frecuencia (F_i). A partir de estas variables relativizadas se estimó el Índice de Valor de Importancia (*IVI*), expresado en porcentaje dentro de una escala de 0 a 100 (Moreno 2001). La abundancia se obtuvo mediante la Ecuación (3), mientras que la dominancia se calculó con la Ecuación (4). La frecuencia se determinó con la Ecuación (5). Finalmente, el *IVI* se definió como el promedio de estas tres variables, de acuerdo con la Ecuación (6).
Abundancia:

$$A_i = {N_i}/{E} \qquad AR_i = \left({A_i}/{\sum_{i=1\ldots n} Ai}\right) \times 100 \quad (3)$$

Donde: A_i es la abundancia absoluta, AR_i la abundancia relativa de la especie i, N_i el número de individuos de la especie i y E la superficie de muestreo (ha).
Dominancia:

$$D_i = {Ab_i}/{E(ha)}$$
$$DR_i = \left({D_i}/{\sum_{i=1\ldots n} Di}\right) \times 100 \quad (4)$$

Donde: D_i es la dominancia absoluta, DR_i la dominancia relativa de la especie i, Ab_i el área basal calculada como Ab = π/4 × DN², DN el diámetro normal del árbol y E la superficie de muestreo (ha) (Romahn & Ramírez, 2010).
Frecuencia:

$$F_i = {P_i}/{NS}$$
$$FR_i = \left({F_i}/{\sum_{i=1\ldots n} Fi}\right) \times 100 \quad (5)$$

Donde: F_i es la frecuencia absoluta, FR_i la frecuencia relativa de la especie i, P_i el número de sitios en los que está presente la especie i y NS el número total de sitios de muestreo.
Índice de valor de importancia (*IVI*).

$$IVI = \frac{AR_i + DR_i + FR_i}{3} \quad (6)$$

La caracterización de la estructura vertical se llevó a cabo mediante el índice de Pretzsch (A) (Ecuación 7), el cual divide la vegetación en tres estratos de altura. El estrato alto corresponde al rango de 80 al 100%, donde el árbol de mayor altura se consideró el 100%. A partir de este valor se delimitaron los demás estratos: el estrato medio abarca el 50-80%, y el estrato bajo comprende el intervalo de 0-50%. Así mismo, se calculó el valor máximo del índice de Pretzsch (A_{max}) para cada especie dentro de cada estrato (Ecuación 8). Este valor A_{max} se alcanza cuando las especies están representadas en proporciones iguales, tanto en el conjunto del rodal como en cada uno de los estratos (Pretzsch, 1996).

$$A = -\sum_{i=1}^{S}\sum_{j}^{Z} p_{ij} * ln(p_{ij}) \quad (7)$$
$$A_{max} = ln\,(S * Z) \quad (8)$$

Donde: A es el índice de Pretzsch, A_{max} el valor máximo del índice, S el número de especies presentes, Z el número de estratos de altura, p_{ij} la proporción de individuos de la especie i en el estrato. El valor de A se estandariza de acuerdo con la Ecuación (9).

$$A_{rel} = \frac{A}{ln(S * Z)} * 100 \quad (9)$$

Donde: A_{rel} es el valor relativo del índice de Pretzsch.

Resultados y discusión

Diversidad

Se registraron 21 especies distribuidas en los 15 sitios de muestreo, pertenecientes a cinco familias: Ericaceae, Cupressaceae, Pinaceae, Fagaceae y Fabaceae. Predominaron las coníferas, principalmente del género *Pinus*. La familia Pinaceae presentó el mayor número de especies, seguida de Fagaceae (Cuadro 1). Estos hallazgos coinciden con lo reportado en estudios previos, donde *Pinus* y *Quercus* concentran la mayor presencia de especies en bosques de la SMO (Silva-García et al., 2021; Martínez-Casas et al., 2025).

Cuadro 1. Especies, géneros y familias registradas.

No.	Especie	Género	Familia
1	*Arbutus arizonica* (A. Gray) Sarg.	*Arbutus*	Ericaceae
2	*Arbutis bicolor* S. Gonzales, M. Gonzales y P.D. Sorensen	*Arbutus*	Ericaceae
3	*Arbutus xalapensis* Hook.	*Arbutus*	Ericaceae
4	*Crupesus lusitánica* Mill	*Cupressus*	Cupressaceae
5	*Juniperus deppeana* Steud.	*Juniperus*	Cupressaceae
6	*Juniperus durangensis* Martínez	*Juniperus*	Cupressaceae
7	*Pinus arizonica* Engelm.	*Pinus*	Pinaceae
8	*Pinus cembroides* Gordon	*Pinus*	Pinaceae
9	*Pinus cooperi* C.E. blanco	*Pinus*	Pinaceae
10	*Pinus durangensis* Martínez	*Pinus*	Pinaceae
11	*Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. Y cham	*Pinus*	Pinaceae
12	*Pinus lumholtzii* B.L. Rob. Y fernald	*Pinus*	Pinaceae
13	*Pinus strobiformis* Engelm.	*Pinus*	Pinaceae
14	*Pinus teocote* Schltdl. Y Cham.	*Pinus*	Pinaceae
15	*Quercus castanea* A. DC.	*Quercus*	Fagaceae
16	*Quercus durifolia* Seemen	*Quercus*	Fagaceae
17	*Quercus mcvaughii* Spellenb.	*Quercus*	Fagaceae
18	*Quercus pennivenia* Trel.	*Quercus*	Fagaceae
19	*Quercus rugosa* (Masam.) J.C. Liao	*Quercus*	Fagaceae
20	*Quercus sideroxyla* Bonpl.	*Quercus*	Fagaceae
21	*Vachellia farnesiana* (L.) Wight y Arn.	*Vachellia*	Fabaceae

La riqueza de especies (*S*) mostró una variación entre 3 y 8 especies por sitio, con un promedio (± desviación estándar) de 4.8 ± 1.78. Los sitios 10 y 11 registraron la mayor

riqueza, mientras que los sitios 5, 7, 8, 12 y 15 presentaron los valores más bajos (Figura 2). La variabilidad observada coincide con lo descrito por Delgado Zamora et al. (2016), quienes señalaron baja similitud entre rodales cercanos de bosque templado en Durango, evidenciando la complejidad ecológica de la SMO. De acuerdo con Whittaker (1972), los gradientes ambientales y las condiciones ecológicas influyen directamente en la composición y número de especies, lo que explica las diferencias registradas entre sitios. En conjunto, la evidencia confirma que la diversidad arbórea en bosques templados de Durango se mantiene en niveles bajos a intermedios, influenciada por factores ambientales y de manejo forestal, lo que coincide con tendencias recientes en comunidades de la SMO (Silva-González et al., 2024).

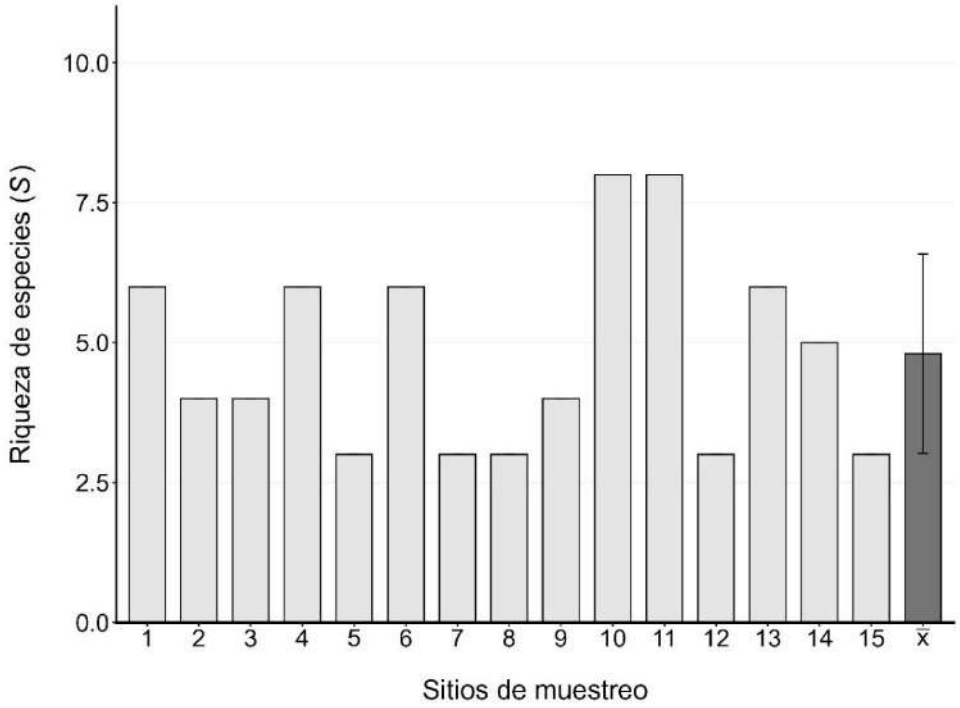


Figura 2. Riqueza de especies por sitio y promedio (x̄). La barra indica la desviación estándar.

El índice de riqueza de Margalef (D_{Mg}) presentó valores que fluctuaron entre 0.45 y 1.41 en los 15 sitios de muestreo, con un promedio general de 0.78 ± 0.32. Los valores más altos se registraron en los sitios 10 (1.41) y 11 (1.33), mientras que los más bajos se concentraron en los sitios 5, 12 y 15, con valores cercanos a 0.45 (Figura 3). De acuerdo con la interpretación

del índice de Margalef (1972), estos resultados reflejan una riqueza específica baja a moderada en la mayoría de los sitios evaluados. Flores-Morales et al. (2022), en un bosque templado bajo manejo en Pueblo Nuevo, Durango, reportaron un índice de Margalef de 2.67, lo que indica una riqueza específica y diversidad moderada en comunidades dominadas por especies de *Pinus* y *Quercus*. De manera similar, Silva-García et al. (2021) señalaron diferencias en la diversidad arbórea de bosques templados en Durango, atribuyendo estas variaciones a la composición florística y a la estructura del ecosistema.

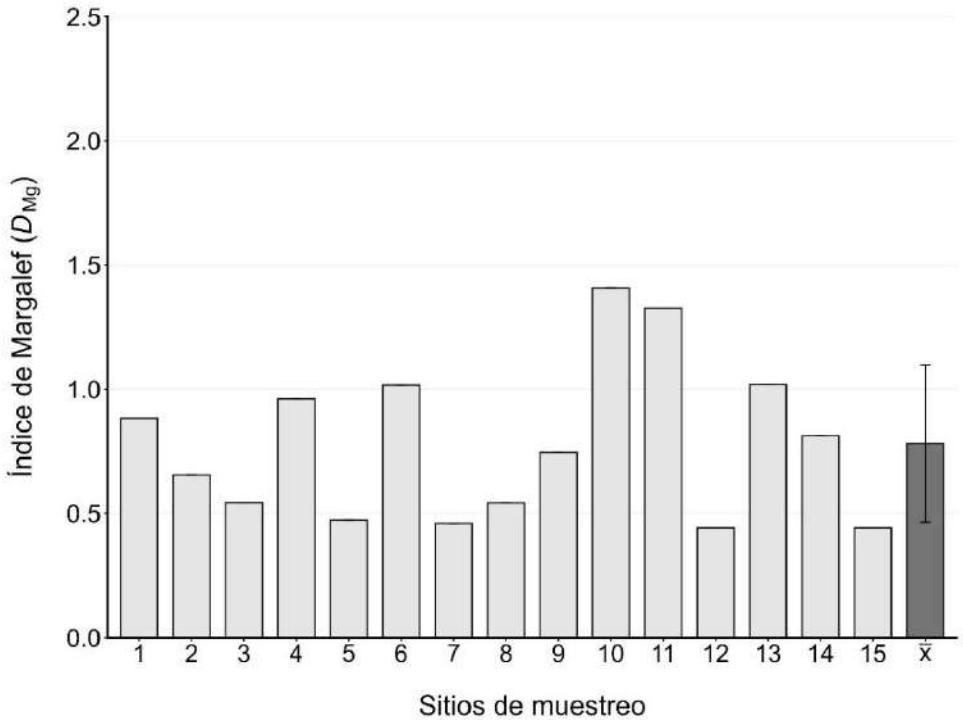


Figura 3. Riqueza de Margalef (D_{Mg}) por sitio y promedio (x̄). La barra indica la desviación estándar.

El índice de diversidad de Shannon-Weaver (H') mostró una variación entre 0.71 y 1.52 en los 15 sitios analizados, con un promedio general de 1.05 ± 1.04. Los valores más altos se registraron en los sitios 11 (1.52), 6 (1.43) y 10 (1.41), mientras que los más bajos correspondieron a los sitios 12 y 8, con valores cercanos a 0.7 (Figura 4). De acuerdo con la interpretación del índice de Shannon-Weaver (1949), estos resultados reflejan una diversidad baja de la comunidad vegetal en el área de estudio. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Graciano-Ávila et al. (2017) en bosques templados de Durango, quienes registraron

valores similares del índice de Shannon-Weaver y señalaron que la diversidad puede estar influenciada por la composición arbórea y las prácticas de manejo forestal. De manera similar, Alanís-Rodríguez et al. (2011) mencionan que los bosques templados del norte de México suelen presentar diversidad de baja a intermedia debido al predominio de especies de *Pinus* y *Quercus*. Asimismo, Magurran (2013) señala que valores bajos del índice de Shannon-Weaver reflejan comunidades con menor equidad en la abundancia de especies, mientras que valores más altos indican una distribución más uniforme de los individuos dentro de la comunidad vegetal.

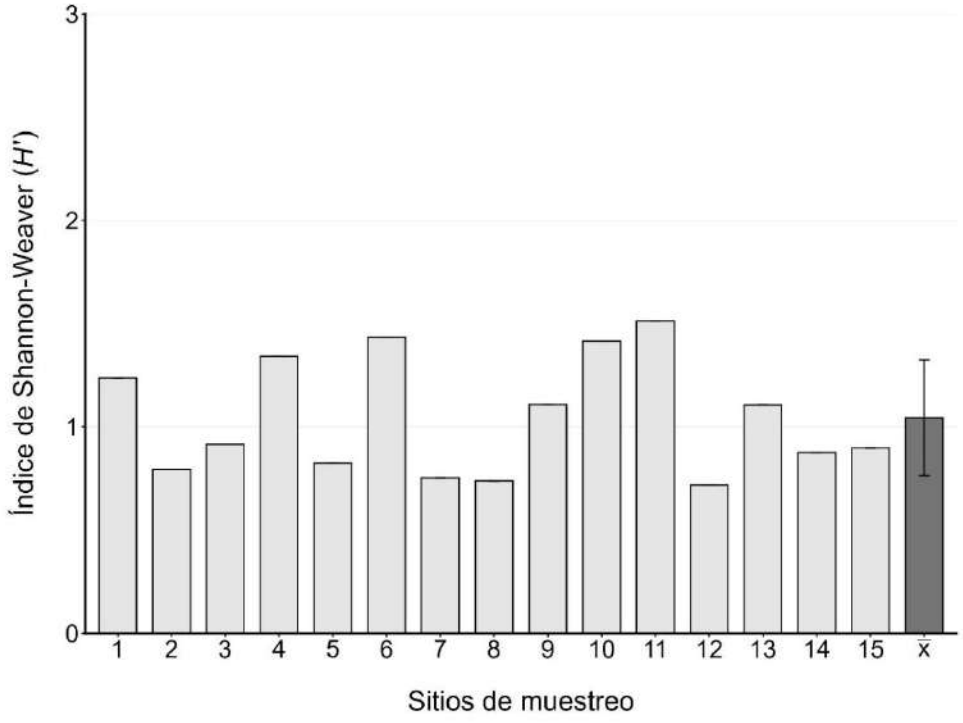


Figura 4. Diversidad de Shannon-Weaver (*H´*) por sitio y promedio (x̄). La barra indica la desviación estándar.

Estructura horizontal

La distribución diamétrica presentó un patrón típico en "*J* invertida", con predominio de individuos en las clases menores. La clase de 10 cm registró la mayor densidad, seguida de la clase de 15 cm. A partir de 40 cm, la abundancia se redujo drásticamente (Figura 5). Este patrón es característico de bosques con regeneración activa y dinámica poblacional estable,

registrado particularmente en bosques bajo tratamientos silvícolas del Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) (Graciano-Luna et al., 2025a).

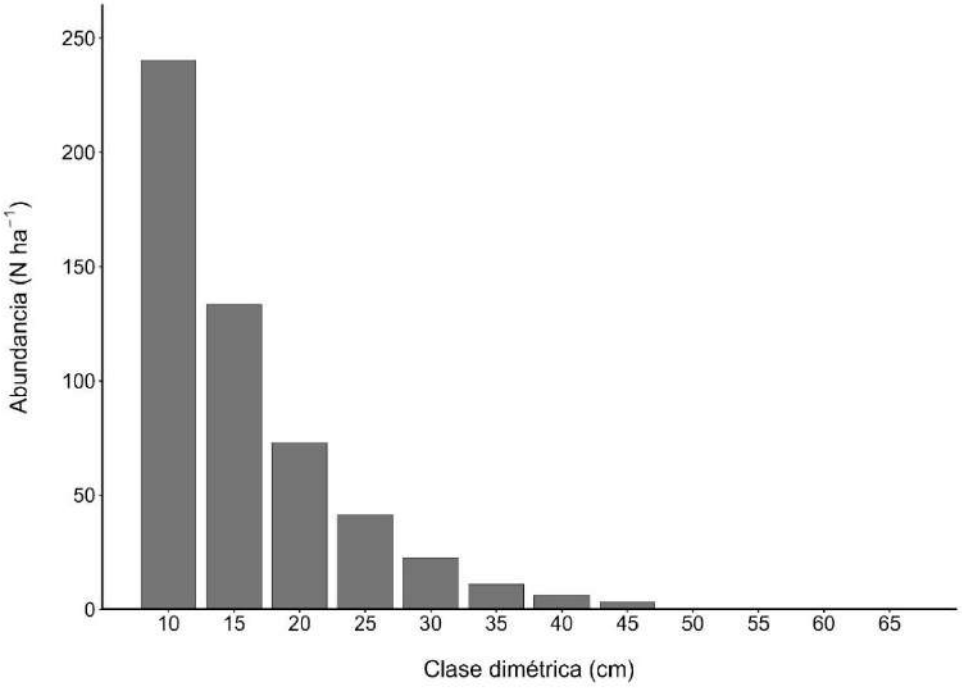


Figura 5. Distribución de individuos por clase diamétrica.

La abundancia total fue de 531.2 N·ha⁻¹. *Pinus teocote* fue la especie más abundante con 124 N ha^{-1}, seguida de *Pinus cembroides* con 78.4 N·ha⁻¹ y *Pinus pennivenia* 77.87 N·ha⁻¹. En conjunto, estas especies concentraron más de la mitad de la abundancia total (52.76 %). En contraste, especies como *Arbutus arizonica*, *Pinus leiophylla* y *Quercus rugosa* presentaron abundancias relativas menores al 1 %. La dominancia total (área basal) fue de 12.56 m^2·ha^{-1}. *Pinus teocote* registró la mayor dominancia con 3.64 m^2·ha^{-1}, seguido de *Quercus pennivenia* con 1.91 m^2·ha^{-1} y *Pinus cembroides con* 1.78 m^2·ha^{-1}. Estas tres especies representaron más de la mitad del total, confirmando su papel estructural dominante (58.39 %). Las especies *Pinus teocote* y *Juniperus deppeana* se registraron en 10 sitios de muestreo, con una frecuencia relativa de 13.89 %, lo que evidencia su amplia distribución y adaptación a las condiciones ambientales predominantes. El *IVI* indicó que *Pinus teocote*, *Quercus pennivenia* y *Pinus cembroides* fueron las especies más relevantes, mientras que otras como *Quercus rugosa* y *Arbutus arizonica* presentaron los valores más bajos, lo que evidencia su rareza relativa (Cuadro 2). La dominancia de *Pinus teocote* en el área de estudio, tanto en

abundancia como en área basal, confirma su papel estructural clave en los bosques templados de México. Este patrón ha sido documentado en comunidades de pino-encino de Guerrero, donde *Pinus teocote* mostró los mayores valores de importancia y dominancia, reflejando su capacidad competitiva frente a otras especies arbóreas (Rodríguez-Pacheco et al., 2023). Asimismo, la presencia significativa de *Pinus cembroides* y *Quercus pennivenia* coincide con estudios en gradientes altitudinales de Chihuahua, que señalan la tendencia de los pinos a mantener mayor altura y biomasa que los encinos, reforzando su papel en la dinámica forestal (García-García et al., 2024). En contraste, especies como *Arbutus arizonica* y *Quercus rugosa* mostraron abundancias y frecuencias muy bajas, lo que evidencia su rareza relativa y vulnerabilidad, un fenómeno también observado en bosques templados del centro de México donde la deforestación ha reducido la diversidad arbórea y el reclutamiento de plántulas (Cruz-Salazar et al., 2024).

Cuadro 2. Índice de Valor de Importancia (%) de cada especie.

Especie	Abundancia		Dominancia		Frecuencia		*IVI* (%)
	N ha^{-1}	%	m^2 ha^{-1}	%	No. Sitios	%	
Pinus teocote	124.00	23.34	3.64	28.98	10.00	13.89	22.07
Quercus pennivenia	77.87	14.66	1.91	15.20	8.00	11.11	13.66
Pinus cembroides	78.40	14.76	1.78	14.21	4.00	5.56	11.51
Juniperus deppeana	45.60	8.58	0.75	5.99	10.00	13.89	9.49
Pinus lumholtzii	49.07	9.24	1.22	9.74	4.00	5.56	8.18
Pinus durangensis	17.07	3.21	0.63	5.01	6.00	8.33	5.52
Quercus sideroxyla	28.53	5.37	0.55	4.41	4.00	5.56	5.11
Quercus mcvaughii	32.00	6.02	0.50	3.99	1.00	1.39	3.80
Pinus arizonica	20.00	3.77	0.69	5.47	1.00	1.39	3.54
Quercus castanea	24.53	4.62	0.31	2.50	1.00	1.39	2.84
Juniperus durangensis	2.67	0.50	0.07	0.53	4.00	5.56	2.20
Pinus strobiformis	1.87	0.35	0.05	0.37	4.00	5.56	2.09
Arbutus bicolor	5.07	0.95	0.06	0.47	3.00	4.17	1.86
Pinus cooperi	2.93	0.55	0.06	0.50	2.00	2.78	1.28
Arbutus xalapensis	8.53	1.61	0.05	0.43	1.00	1.39	1.14
Quercus durifolia	5.07	0.95	0.14	1.08	1.00	1.39	1.14
Cupressus lusitanica	2.13	0.40	0.02	0.13	2.00	2.78	1.10
Vachellia farnesiana	1.87	0.35	0.02	0.18	2.00	2.78	1.10
Pinus leiophylla	0.53	0.10	0.01	0.07	2.00	2.78	0.98
Quercus rugosa	2.93	0.55	0.09	0.69	1.00	1.39	0.88

Arbutus arizonica	0.53	0.10	0.01	0.05	1.00	1.39	0.51
Total	531.20	100.00	12.56	100.00	72.00	100.00	100.00

Estructura vertical

Se definieron tres estratos de altura, alto (20.72 - 25.90 m), medio (12.95 - 20.71 m) y bajo (0 – 12.94 m). El estrato alto se encuentra conformado por *Pinus teocote,* y *Pinus arizonica* con 3.73 N ha^{-1}, lo que equivale al 0.70 % de la zona. El estrato medio lo conforman *Pinus teocote, Pinus arizonica, Pinus durangensis, Pinus lumholtzii, Quercus pennivenia, Pinus cembroides, Pinus strobiformis, Quercus sideroxyla, Juniperus deppeana, Pinus cooperi y Quercus rugosa* con 42.93 N ha^{-1} que representan el 8.08 % de la zona. En el estrato bajo se registraron todas las especies del área de estudio con 484.53 N ha^{-1} lo que representa el 91.21 % de la zona. La especie más abundante fue *Pinus teocote* con 99.73 N ha^{-1} seguida de *Pinus cembroides* con 77.60 N ha^{-1} y *Quercus pennivenia* con 76.27 N ha^{-1} (Cuadro 3). El valor del índice *A* fue de 2.59 con un valor de A_{max} de 4.14 y A_{rel} de 62.60 %, lo que indica que la zona evaluada tiene uniformidad media, en diversidad de alturas. Los valores de A_{rel} cercanos a 100 % indican que todas las especies se encuentran distribuidas de forma equitativa en los tres estratos de altura. La presencia dominante de *Pinus teocote* en todos los estratos confirma su plasticidad ecológica y capacidad de adaptación, lo que coincide con lo descrito por González-Elizondo et al. (2012) y Dávila-Lara et al. (2019). Además, estudios recientes como el de Amaran-Ruiz et al. (2026) señalan que la distribución vertical en bosques templados de Durango refleja procesos de regeneración continua y estabilidad estructural, lo que se observa también en el área de estudio.

Cuadro 3. Estructura vertical del bosque a través del índice Pretzsch (*A*).

Especie	N	N ha^{-1}	Proporción	
			Del total	En la Zona
Estrato alto (20.72 - 25.90 m)				
Pinus teocote	8	2.13	57	0.40
Pinus arizonica	6	1.60	43	0.30
SUMA	14	3.73	100	0.70
Estrato medio (12.95 - 20.71 m)				
Pinus teocote	83	22.13	51.55	4.17
Pinus arizonica	32	8.53	19.88	1.61
Pinus durangensis	16	4.27	9.94	0.80
Pinus lumholtzii	15	4.00	9.32	0.75
Quercus pennivenia	6	1.60	3.73	0.30

Pinus cembroides	3	0.80	1.86	0.15
Pinus strobiformis	2	0.53	1.24	0.10
Quercus sideroxyla	1	0.27	0.62	0.05
Juniperus deppeana	1	0.27	0.62	0.05
Pinus cooperi	1	0.27	0.62	0.05
Quercus rugosa	1	0.27	0.62	0.05
SUMA	161	42.93	100	8.08
Estrato bajo (0 – 12.94 m)				
Pinus teocote	374	99.73	20.58	18.78
Pinus cembroides	291	77.60	16.02	14.61
Quercus pennivenia	286	76.27	15.74	14.36
Juniperus deppeana	170	45.33	9.36	8.53
Pinus lumholtzii	169	45.07	9.30	8.48
Quercus mcvaughii	120	32.00	6.60	6.02
Quercus sideroxyla	106	28.27	5.83	5.32
Quercus castanea	92	24.53	5.06	4.62
Pinus durangensis	48	12.80	2.64	2.41
Pinus arizonica	37	9.87	2.04	1.86
Arbutus xalapensis	32	8.53	1.76	1.61
Arbutus bicolor	19	5.07	1.05	0.95
Quercus durifolia	19	5.07	1.05	0.95
Pinus cooperi	10	2.67	0.55	0.50
Juniperus durangensis	10	2.67	0.55	0.50
Quercus rugosa	10	2.67	0.55	0.50
Cupressus lusitanica	8	2.13	0.44	0.40
Vachellia farnesiana	7	1.87	0.39	0.35
Pinus strobiformis	5	1.33	0.28	0.25
Pinus leiophylla	2	0.53	0.11	0.10
Arbutus arizonica	2	0.53	0.11	0.10
SUMA	1817	484.53	100	91.21
TOTAL	1992	531.20	300	100.00

Conclusiones

El análisis realizado en el bosque templado de la Sierra Madre Occidental, Durango, evidencia que la diversidad arbórea se mantiene en niveles bajos a intermedios, influenciada por factores ambientales y las prácticas de manejo forestal. La dominancia estructural de *Pinus teocote*, junto con *Quercus pennivenia* y *Pinus cembroides*, confirma el papel central de estas especies en la dinámica del ecosistema, tanto en la estructura horizontal como en la vertical. La distribución diamétrica en "*J* invertida" y la presencia de individuos en todos los estratos reflejan procesos de regeneración activa y estabilidad poblacional. Estos hallazgos subrayan la importancia de continuar implementando estrategias de manejo sostenible que fortalezcan la conservación de la diversidad y aseguren la permanencia de los servicios ecosistémicos, garantizando así el bienestar de las comunidades locales y la resiliencia de los bosques templados frente a presiones ambientales y antrópicas.

Literatura citada

Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Valdecantos-Dema, A., Pando-Moreno, M., Aguirre-Calderón, O. A., & Treviño-Garza, E. J. (2011). Caracterización de regeneración leñosa post-incendio de un ecosistema templado del parque ecológico Chipinque, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 17*(1), 31–39. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.05.032

Amaran-Ruiz, M. de F., Alanís-Rodríguez, E., García-Espinoza, G. G., Estrada-Castillón, A. E., Aguirre-Calderón, O. A., Cuéllar-Rodríguez, L. G., & Luna-Robles, A. A. (2026). Estructura y contenido de carbono de un bosque templado asociado a un cuerpo de agua en el estado de Durango. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 23*(52), 22–31. https://doi.org/10.18845/rfmk.v23i52.8439

Corral-Rivas, J. J., Vargas-Larreta, B., Aguirre-Calderón, O. A., & Hernández, F. J. (2009). *Guía para establecer sitios permanentes de monitoreo forestal en México*. Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Forestales.

Cruz-Salazar, B., Tlapa-Haro, A., George-Miranda, S., Estrada-Torres, A., & Martínez-Pérez, J. L. (2024). Impacto de la deforestación en el reclutamiento y diversidad de plántulas arbóreas de un bosque templado del centro de México. *Madera y Bosques, 30*(1), e3012603. https://doi.org/10.21829/myb.2024.3012603

Dávila-Lara, M. A., Aguirre-Calderón, O. A., Jurado-Ybarra, E., Treviño-Garza, E., González-Tagle, M. A., & Trincado, G. (2019). Estructura y diversidad de especies arbóreas en bosques templados de San Luis Potosí, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 6*(18), 399–409. https://doi.org/10.19136/era.a6n18.2112

Delgado-Zamora, D. A., Heynes-Silerio, S. A., Mares-Quiñones, M. D., Piedra-Leandro, N. L., Retana-Rentería, F. I., Rodríguez-Corral, K., Villanueva-Hernández, A. I., Gonzáles-Elizondo, M. S., & Ruacho-González, L. (2016). Diversidad y estructura arbórea de dos rodales en Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 7*(33), 95–107.

Flores-Morales, E. A., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Alanís-Rodríguez, E., Ángeles-Pérez, G., & Huizar-Amezcua, F. (2022). Diversidad y estructura de un bosque templado bajo manejo en el municipio de Pueblo Nuevo, Durango, México. *Polibotánica, 54*(27), 22–31. https://doi.org/10.18387/polibotanica.54.2

García-García, S. A., Alanís-Rodríguez, E., Rubio-Camacho, E. A., Aguirre-Calderón, O. A., Yerena-Yamallel, J. I., Cuéllar-Rodríguez, L. G., & Collantes-Chávez-Costa, A. (2024). Distribución espacial de *Pinus* y *Quercus* en un gradiente altitudinal de bosque templado en Guadalupe y Calvo, Chihuahua. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 15*(81), 33–58. https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1426

Gonzáles-Elizondo, M. S., Gonzáles-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: A synthesis. *Acta Botánica Mexicana, 100*, 351–403. https://doi.org/10.21829/abm100.2012.40

Graciano-Ávila, G., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., & Luján-Soto, J. E. (2017). Composition, structure and diversity of tree species in a temperate forest in Northwestern Mexico. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 4*(12), 535–542. https://doi.org/10.19136/era.a4n12.1114

Graciano-Luna, J. de J., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., Cantú-Ayala, C. M., Yerena-Yamallel, J. I., Martínez-Adriano, C. A., & Luján-Soto, J. E. (2025a). Estructura y diversidad arbórea bajo dos esquemas de manejo forestal e influencia de la orientación geográfica en un bosque de Durango, México. *Polibotánica, 60*, e009. https://doi.org/10.18387/polibotanica.60.9

Graciano-Luna, J. de J., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., Cantú-Ayala, C. M., Yerena-Yamallel, J. I., Luján-Soto, J. E., & Martínez-Adriano, C. A. (2025b). Composición y estructura de un bosque bajo manejo forestal en el estado de Durango, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 12*(V), 1–20. https://doi.org/10.19136/era.a12nV.4549

Magurran, A. E. (2013). *Measuring biological diversity*. Wiley-Blackwell.

Margalef, R. (1958). Information theory in ecology. *General Systems, 3*, 36–71.

Margalef, R. (1972). Homage to Ramon Margalef, or, why is it worthwhile to study ecosystems. *Oecologia Aquatica*.

Martínez-Casas, R., Monárrez-González, J. C., Torres-Rojo, J., & Pérez-Verdín, G. (2025). Evaluación de la regeneración natural en bosques templados con cubierta forestal continua en el noroeste de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad, 96*, e965499. https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2025.96.5499

Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad*. M&T-Manuales y Tesis SEA.

Pretzsch, H. (1996). Structural diversity of mixed stands of Norway spruce and common beech along a productivity gradient. *Forest Ecology and Management, 86*(1–3), 11–28. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(96)03764-7

Ríos-Camey, J. M., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E., & De Los Santos-Posadas, H. M. (2021). Crecimiento e incremento en biomasa y carbono de *Pinus teocote* Schltdl. et Cham. y *Pinus oocarpa* Schiede., Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 12*(67), 82–101. https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i67.997

Rodríguez-Pacheco, A., Palacios-Rangel, M. I., Mohedano-Caballero, L., & Villanueva-Morales, A. (2023). Estructura y diversidad arbórea de un bosque de pino-encino en Huiztlatzala, Guerrero, México. *Polibotánica, 55*, 1–20. https://doi.org/10.18387/polibotanica.55.3

Romahn, C. F., & Ramírez, H. (2010). *Dasometría*. Universidad Autónoma Chapingo.
Shannon, C. E., & Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press.

Silva-García, J. J., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., & Jiménez-Pérez, J. (2021). Estructura y diversidad arbórea en bosques templados de Durango, México. *Polibotánica, 52*, 89–102. https://doi.org/10.18387/polibotanica.52.7

Silva-González, E., Colín, J. G., Aguirre-Calderón, O. A., Treviño-Garza, E. J., Corral-Rivas, J. J., & Manzanilla-Quijada, G. E. (2024). Diversidad y estructura de especies arbóreas en tres tipos de vegetación forestal al sur de Durango, México. *Polibotánica, 58*(29), 22–31. https://doi.org/10.18387/polibotanica.58.7

Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity. *Taxon, 21*(2/3), 213–251.

Evaluación de la Fertilidad e Índices de Sostenibilidad de los Suelo en Parcelas con Nopal Orgánico y Convencional en Axapusco, México

Álvarez Hernández Rogelio[35], Salazar Torres José Cruz[36], Galán Reséndiz Miriam[37]

Resumen

En parcelas con producción orgánica y convencional de nopal en Axapusco, al NE de la Ciudad de México, se muestrearon según la NOM-2002, 16 sitios, se evaluó la fertilidad y se estimó el Índice Agrícola de Sustentabilidad del Suelo (IASS). La fertilidad en ambas condiciones fue muy variable con bajo contenido de N, Fe, Cu, Zn, Mn y MO; con un pH de 5.6 a 7.8. El 68.75% de los suelos tuvieron nivel 3 (sustentabilidad con alto uso de insumos); 18.75%, nivel 4 (sustentabilidad con otro uso de suelo) y 12.5%, nivel 2 (sustentabilidad). A pesar del manejo orgánico, no hubo diferencias en fertilidad y sostenibilidad. El principal parámetro de impacto sobre IASS fue la baja proporción de C orgánico propiciado por el cultivo y la baja aportación de MO por los productores. Hay diversas prácticas agroecológicas aplicables para mejorar las condiciones del suelo, pero, la situación cultural y socioeconómica de los productores sólo permitiría establecer una alternativa a mediano y largo plazo. Se trata de zonas secas y con paso continuo de ovinos y accidentalmente hay quemas de pastos y arvenses, lo que disminuye el contenido de MO. El Índice de Sostenibilidad del Suelo (SSI) es una medida comparativa de la calidad del suelo mediante un gradiente de disturbio o estrés, de la estabilidad de sus características en el tiempo y sus interacciones ambientales internas y externas, que propician su degradación

Palabras clave: Nopal tunero, sustentabilidad de suelos, estructura del suelo, degradación del suelo, producción orgánica.

Abstract

In plots with organic and conventional nopal production in Axapusco, NE, Mexico City, 16 sites were sampled according to the NOM-2002, where fertility was evaluated and the Agricultural Soil Sustainability Index (ASSI) was estimated. Fertility in both management conditions was highly variable with low N, micronutrients and OM contents and pH 5.6 to

[35] Departamento de Preparatoria Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, Profesor-Investigador. Centro de Investigación en Biología, Educación Ambiental y Agricultura Orgánica (CIBEAO-UACh-DGIPS). ralvarezh@chapingo.mx
[36] Departamento de Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo, Profesor-Investigador. jocusamx.yahoo.mx
[37] Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo, Profesor-Investigador. Centro de Investigación en Biología, Educación Ambiental y Agricultura Orgánica (CIBEAO-UACh-DGIPS). mgalanr@chapingo.mx

7.8. The 68.75% of the soils had level three (sustainability with high use of inputs); 18.75% were level 4 (sustainability with other land use) and 12.5%, level two (sustainability). In spite of the organic management, in fertility and sustainability there were no differences in the farms. The main parameter of impact on ASSI was the low proportion of SOC favored by the type of crop and low OM contributions by the producers. There are various agroecological practices applicable to improve soil conditions, but the cultural and socioeconomic situation of the producers would only allow establishing an alternative in the medium and long term. These are dry areas with continuous passage of sheep and there are accidentally burning of pastures and weeds, which decreases the OM content. The Soil Sustainability Index (SSI) is a comparative measure of soil quality through a gradient of disturbance or stress, the stability of its characteristics over time and its internal and external environmental interactions, which promote its degradation.

Keywords: Prickly pear cactus, soil sustainability, soil structure, land degradation, organic production.

Introducción

El consumo de alimentos orgánicos aumenta en todo el mundo, ya sea por estatus o por salud. Y cada vez son más los restaurantes y usuarios en México que requieren de estos productos. Actualmente, la producción de nopal y tuna orgánica en México, es una realidad, a pesar del escepticismo de productores, académicos e investigadores (Mejía, 2006). En varios estados del país existe producción orgánica de nopal y tuna, aunque en la mayor parte de estas entidades la producción muy escasa. En el estado de México se produce, tuna blanca, tuna roja, xoconostle y nopal orgánico (Mejía, 2006). La producción orgánica es un sistema holístico de gestión de la producción, esto es, que valora la función del conjunto más allá de la suma de cada una de las partes (cultivo, pastura, animales, gestión, productor, etc.). Esta producción fomenta y mejora la salud del agroecosistema y la biodiversidad, los ciclos biológicos y la actividad biológica del suelo. Hace hincapié en el empleo de prácticas de gestión adaptadas localmente, prefiriéndolas respecto del uso de insumos externos al predio. Siempre que sea posible, emplea métodos culturales, biológicos y mecánicos, en contraposición al uso de materiales sintéticos. Los sistemas de producción orgánica se basan en normas de producción específicas y precisas, cuya finalidad es lograr agroecosistemas óptimos que sean sostenibles desde el punto de vista social, ecológico y económico (FAO/OMS, 2001). La producción orgánica fomenta y mejora la salud del agroecosistema, la biodiversidad, los ciclos biológicos y la actividad biológica del suelo (Allen *et al*., 1991). La sustentabilidad es el uso de los recursos de manera que satisfaga las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas. El manejo sustentable del suelo es el conjunto de prácticas que ofrecen las condiciones al terreno para

una gran bioactividad y permiten el mejoramiento y mantenimiento de su fertilidad que garantice la producción y productividad de los cultivos. Para mantener suelos productivos y ecosistemas saludables y sustentables, se asumen los siguientes principios: conservar la cobertura vegetal, evitar erosión y pérdida de humedad, mantener la bioactividad del suelo, rotar y diversificar cultivos, evitar el agotamiento de nutrimentos, prevenir plagas y enfermedades, usar racionalmente fertilizantes y pesticidas, evitar la contaminación química y degradación del suelo, manejar eficientemente el agua y regar a responsablemente, conservar los humedales, mejorar la infiltración y retención de humedad, reforestar y proteger los bosques, mantener la biodiversidad, integrar el conocimiento local y científico combinando experiencia empírica con técnicas modernas de manejo sostenible (FAO/OMS, 2001; Socorro, 2006).

No mantener la sustentabilidad de los suelos desencadena un efecto dominó que transforma un recurso renovable en uno no renovable a escala humana, creando consecuencias irreversibles en varios niveles: (a) Colapso de la seguridad alimentaria por una reducción progresiva de la agroproductividad y pérdida de tierras cultivables, lo que reduce la disponibilidad de alimentos y afecta los medios de vida rural. (b) Crisis hídrica y aumento de desastres naturales [aumento de sequías, inundaciones, colapso de acuíferos y deslaves] debido a la degradación del suelo y la alteración del ciclo hidrológico. (c) Pérdida de biodiversidad y de los servicios ecosistémicos que impacta en la desaparición de especies y deterioro de funciones esenciales de los ecosistemas [polinización, la regulación del clima y la conservación del suelo]. (d) Aceleración del cambio climático a causa de la liberación de C y otros gases de efecto invernadero almacenados en los suelos y la vegetación, ayudando al calentamiento global. (e) Reducción de la resiliencia de ecosistemas causando su mayor vulnerabilidad y degradación frente a eventos climáticos extremos, reduciendo su capacidad de recuperación natural. (f) Impactos sociales y económicos [aumento de migración climática por pérdida de medios de subsistencia], conflictos por el acceso a tierras fértiles y agua dulce; tensiones sociales y más dependencia de insumos externos para mantener la agroproducción (Rahmanipour, 2014; Tesfahunegn, 2014).

El uso sustentable de los recursos del suelo depende de tres factores que interactúan, dinámicamente, como una serie de sistemas y el cambio en un factor altera a los otros (Allen *et al*., 1991; Rahmanipour, 2014) y son: (i) características del suelo relacionadas con el ambiente, (ii) hidrología y (iii) condiciones de uso de la tierra. Dicho uso sustentable se refiere al manejo como recurso natural sin ejercer efectos negativos o insuperables en condiciones racionales, ya sea en el propio suelo u otros sistemas del entorno. La sostenibilidad del suelo se puede lograr con métodos prácticos de gestión, y sólo se asegura si el flujo de materia y energía de los procesos edáficos se controlan e influyen positivamente (Zinck & Farshad, 1995; Tesfahunegn, 2014). El manejo correcto de un suelo es preciso para

resguardar su fertilidad, obtener más productividad y respeto ambiental. Garantizar un uso sostenible del suelo es el principal objetivo de una correcta gestión que debe integrar otras políticas comunitarias [agricultura, desarrollo regional y uso de energía] (Allen *et al*., 1991).

La sostenibilidad del uso y conservación del suelo depende de (i) su capacidad para efectuar y mantener su función, (ii) su capacidad de resiliencia ante los impactos en el tiempo y (iii) la presión cambiante de las amenazas degradativas (Lal, 1994; Tesfahunegn, 2014). Estas amenazas son: erosión, salinización, pH extremo, compactación, pérdida de MO y biodiversidad, solifluxión, contaminación, sellado del suelo, baja retención de agua, alteración de ciclos biogeoquímicos, lenta descomposición de contaminantes y reducción de fertilidad. Todo ello impacta la calidad del agua, aire, cadenas tróficas, cambio climático, biosfera y amenaza la seguridad de alimentos y forrajes. La degradación de suelos ha crecido por falta de conocimiento de los agricultores y por mal manejo (Imaz *et al*., 2010; Rahmanipour, 2014).

La sostenibilidad edáfica se vincula con la calidad del suelo, que es la capacidad y límites de uso de un suelo para funcionar en un ecosistema, sostener la actividad biológica, mantener la calidad ambiental, y promover la flora, la fauna y la salud humana (SQI, 1996); así, si los indicadores de calidad del suelo son óptimos, el rendimiento agrícola será el máximo obtenible con menor degradación del terreno. Los suelos agrícolas con un buen estado físico y calidad tienen estructura estable, adecuada resistencia a la erosión y a la compactación y aportan una condición propicia al crecimiento vegetal, al desarrollo y a la proliferación de raíces y microorganismos (Rahmanipour *et al*., 2014; Raiesi & Kabiri, 2016).

El Índice de Sostenibilidad del Suelo (*SSI, Soil Sustainability Index*) es un indicador compuesto que se utiliza para evaluar el estado y la sostenibilidad de un suelo con base en sus propiedades físicas (Dap, estabilidad de agregados, infiltración, capacidad de retención de agua, textura), químicas (pH, MO, C orgánico, N, P, CIC, salinidad) y biológicas (biomasa microbiana, actividad enzimática, respiración del suelo, diversidad de microorganismos). Es importante señalar que el SSI no es un índice estandarizado a nivel internacional, su formulación varía entre estudios y proyectos, por lo que, al utilizarlo en una investigación o evaluación técnica, conviene especificar la metodología, los indicadores seleccionados y el sistema de ponderación empleado, diferentes instituciones adaptan el índice según el objetivo y el tipo de ecosistema (Qui *et al*., 2009; Tesfahunegn, 2014, Paz-Ferreiro & Fu, 2016). El método de evaluación de calidad y sostenibilidad del suelo permite mejorar su uso y manejo; debe ser muy flexible y de fácil medición y con sensibilidad al cambio de las condiciones del suelo, a fin de vincularlo con la evaluación de riesgos de degradación.

El SSI es una medida comparativa de la calidad del suelo mediante un gradiente de disturbio o estrés, de la estabilidad de sus características en el tiempo y sus interacciones ambientales internas y externas, que propician su degradación; se define como:

$$SSI = X\ SQI\ (100 - CDE) \qquad (1)$$

Dónde: IQS es el Índice de Calidad del Suelo y CDE es el efecto acumulativo de degradación.

y permite identificar un uso sostenible y correcto. El SSI se utiliza para evaluar la salud del suelo en agrosistemas, comparar diferentes prácticas de manejo, monitorear procesos de degradación y recuperación, apoyar programas de agricultura sostenible y medir el impacto de estrategias de conservación del suelo. Se usan diversos indicadores de calidad de los suelos tales como el Conjunto Total de Datos (TDS) y el Conjunto Mínimo de Datos (MDS) (Lal, 1994; Chen *et al*., 2013). Estos índices representan efectos acumulativos de las propiedades del suelo como un índice de la función de cada indicador en la calidad del suelo (Lal, 1994; Erkossa, 2007; Askari & Holden, 2014; Rodríguez *et al*., 2016); estos índices sólo se calculan mediante datos de análisis del suelo, el cual es necesario si se quiere una buena gestión, pues representa información esencial para un buen manejo. Por ello se intenta lograr los siguientes objetivos. Evaluar la fertilidad de los suelos bajo diferentes condiciones de manejo, conocer las propiedades físicas y químicas de los suelos en predios sembrados con nopal orgánico y en predios bajo manejo convencional, sugerir una propuesta de manejo de la fertilidad de los suelos en estudio y calcular los indicadores de sostenibilidad de los suelos en predios con nopal orgánico y convencional y sugerir estrategias de gestión.

Materiales y métodos

El trabajo se realizó en Axapusco, estado de México en la parte NE del estado, en las coordenadas 98º 47’ 50” longitud W y 19º 43’ 10” latitud N, a una altitud de 2,350 metros, con un clima templado seco con lluvias en verano, donde hay producción orgánica y convencional de nopal y tuna. El muestreo de suelos, según la NOM SUELOS-DOF-31-12-2002 (NOM, 2002), se efectuó en 4 predios sembrados con nopal tunero en 4 zonas por predio, resultando 16 sitios muestreados (Cuadro 1). El muestreo de suelos se efectuó en 4 predios sembrados con nopal tunero: predio 1 manejo orgánico, predio 2 manejo orgánico, predio 3 manejo convencional y predio 4 manejo convencional. Se muestreó en zig - zag obteniendo de 15 a 25 muestras de suelo por sitio y con ellas se formó una muestra compuesta usando el sistema de cuarteos diagonales, eliminando restos vegetales u orgánicos recientes, grava, basura y piedras. Se muestreó en 4 zonas diferentes por cada predio, esto es: (a) AM, zonas de amortiguamiento en nopal orgánico u orillas en predios con manejo convencional, (b) PL, áreas junto a las plantas de nopal, (c) IN, áreas entre plantas de nopal y (d) LN,

espacios entre líneas de plantación; de ello resultaron 16 sitios de muestreo (Cuadro 1). Lo anterior se realizó de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana [NOM SUELOS-DOF-31-12-2002 (NOM, 2002)].

Cuadro 1. Relación de los sitios de muestreo en suelos de cuatro predios sembrados con nopal tunero en el municipio de Axapusco, Estado de México.

Sitios		Manejo orgánico	Sitios		Manejo convencional
S1-OPL	S2-OPL	Junto a las plantas	S3-CPL	S4-CPL	Junto a las plantas
S1-OIN	S2-OIN	Entre plantas	S3-CIN	S4-CIN	Entre plantas
S1-OAM	S2-OAM	Zona de amortiguamiento	S3-CAM	S4-CAM	Zona de amortiguamiento
S1-OLN	S2-OLN	Entre líneas de plantación	S3-CLN	S4-CLN	Entre líneas de plantación

Nota: La letra O, representa predios bajo manejo orgánico y la letra C indica sitios con manejo convencional.

Los análisis básicos de fertilidad se realizaron en el Laboratorio Central Universitario de la UACh de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM SUELOS-DOF-31-12-2002 (NOM, 2002). Se determinaron las siguientes propiedades de los suelos:

Propiedades físicas: (1) Textura del suelo. Método del hidrómetro de Bouyoucos. (2) Densidad aparente del suelo. Método de la parafina. (3) Densidad real. Método del picnómetro. (4) CC. Método de la placa de presión. (5) PMP. Método de la membrana permeable. (6) Humedad aprovechable. Por diferencia entre valores de *CC* y *PMP*. (7) Conductividad hidráulica. Método del Nivel Constante (8) Espacio poroso. Se determinó por cálculo.

Propiedades químicas: (1) pH. En solución de suelo-agua destilada [1:2]. (2) $N\text{-}NO_3^-$. Por extracción con KCl, 2N y determinado por arrastre de vapor. (3) P aprovechable. Método de Bray. (4) K^+ soluble. $C_2H_3O_2NH_4$ 1.0 N, pH 7.0 relación 1:2 y determinado con espectrofotómetro de absorción de flama (5) Ca^{2+} y Mg^{2+}. Extraídos con $C_2H_3O_2NH_4$ 1.0 N, pH 7.0 relación 1:2 y determinados con un espectrofotómetro de absorción atómica. (6) Fe, Cu, Zn y Mn. Extraídos con DTPA relación 1:4 y determinados por espectrofotometría de absorción atómica. (7) Boro. Extraído con $CaCl_2$ 1.0M y fotocolorimetría de Azometina-H. (8) Materia orgánica. Método de Walkley y Black. (9) Ntotal. Método de Kjeldahl (10) Capacidad de Intercambio Catiónico [CIC]. Con $C_2H_3O_2NH_4$ 1.0N pH 7.0 y centrifugación. (11) Porcentaje de Saturación de Bases [PSB]. Se determinó por cálculo.

Las interpretaciones de los resultados de los análisis de suelos se realizaron conforme con Castellanos *et al.,* (2000) y la Norma Oficial Mexicana NOM SUELOS-DOF-31-12-2002 (NOM, 2002), los resultados se presentan en los Cuadro 2 y 3. Con base a los resultados se definieron las categorías y los niveles de fertilidad del suelo.

Las interpretaciones de los resultados de los análisis de suelos se realizaron de acuerdo con Castellanos *et al.*, (2000) y la Norma Oficial Mexicana NOM SUELOS-DOF-31-12-2002 (NOM, 2002), los resultados se presentan en los Cuadro 2 y 3. Con base a los resultados se definieron las categorías y los niveles de fertilidad del suelo.

Se procedió a realizar una comparación estadística de los resultados de los análisis de suelos en los predios referidos.

Cuadro 2. Interpretación de resultados de materia orgánica y propiedades físicas de los suelos de cuatro predios sembrados con nopal tunero en el municipio de Axapusco, Estado de México

Sitio	%MO	Aireación	Retención	Conductividad hidráulica	Textura	Tipo	Adhesión	Infiltración	Agua disponible
S1OPL	Alto	Excelente	Baja	Media	Franco aren.	Gruesa	Mínima	Excesiva	Media
S1OIN				Mod. baja					
S1OAM				Baja					
S1OLN	Mod. bajo			Mod. baja					
S2OPL		Buena	Media	Muy baja	Franco	Media	Ligera	Buena	
S2OIN	Medio								
S2OAM	Mod. bajo								
S2OLN				Baja					
S3CPL	Alto	Excelente	Baja		Franco aren.	Gruesa	Mínima	Excesiva	
S3CIN				Muy baja					
S3CAM	Medio	Buena	Media	Baja	Franco	Media	Ligera	Buena	
S3CLN	Mod. alto	Excelente	Baja		Franco aren.	Gruesa	Mínima	Excesiva	
S4CPL	Alto								
S4CIN	Mod. bajo	Buena	Media		Franco	Media	Ligera	Buena	
S4CAM									
S4CLN	Medio	Excelente	Baja	Media	Franco aren.	Gruesa	Mínima	Excesiva	

Cuadro 3. Interpretación de resultados de los análisis químicos de suelos de cuatro predios sembrados con nopal tunero en el municipio de Axapusco, Estado de México

Sitio	pH	N	P	K	Ca	Mg
		Macronutrimentos en ppm			Micronutrimentos en ppm	
S1OPL	Neutro	Bajo	Muy alto	Alto	Alta	Muy alta
S1OIN		Medio	Alto	Mod. alto	Mod. alta	Muy alta
S1OAM	Mod. ácido	Bajo	Mod. alto	Mod. alto	Mod. alta	Muy alta
S1OLN	Neutro	Bajo	Muy alto	Muy alto	Mod. alta	Muy alta
S2OPL	Mod. ácido	Bajo	Muy alto	Mod. alto	Media	Mod. alta
S2OIN	Mod. ácido	Medio	Mod. alto			Mod. alta
S2OAM	Neutro		Medio			Alta
S2OLN	Neutro		Mod. alto			Mod. alta
S3CIN	Mod. ácido		Alto			Muy alta
S3CPL	Mod. ácido		Muy alto			Muy alta
S3CAM	Mod. ácido		Alto	Muy alto		Mod. alta
S3CLN	Neutro	Bajo	Muy alto	Alto	Mod. alta	Muy alta

S4CPL	Neutro	Muy alto		Mod. alto	Media	Muy alta
S4CIN	Neutro	Bajo		Muy alto	Media	Mod. alta
S4CAM	Mod. alcal.	Bajo		Mod. alto	Alta	Alta
S4CLN	Mod. alcal.	Medio		Mod. alto	Mod. alta	Muy alta

Sitio	Micronutrimentos en ppm				
	Fe	Cu	Zn	Mn	B
S1OPL	Mod. alta	Muy alta	Mod. alta	Alto	Muy alto
S1OIN	Alta	Alta	Mod. alta	Alto	Muy alto
S1OAM	Alta	Alta	Mod. baja	Muy alto	Muy alto
S1OLN	Media	Mod. alta	Media	Mod. alto	Alto
S2OPL	Alta	Muy alta	Mod. alta	Muy alto	Muy alto
S2OIN	Muy alta	Muy alta	Media	Muy alto	Muy alto
S2OAM	Mod. alta	Alta	Media	Alto	Alto
S2OLN	Mod. alta	Muy alta	Media	Alto	Muy alto
S3CIN	Alta	Alta	Media	Muy alto	Alto
S3CPL	Alta	Muy alta	Mod. alta	Mod. alto	Alto
S3CAM	Alta	Alta	Media	Muy alto	Alto
S3CLN	Media	Mod. alta	Mod. baja	Mod. alto	Muy alto
S4CPL	Media	Alta	Mod. alta	Alto	Muy alto
S4CIN	Media	Mod. alta	Media	Mod. alto	Muy alto
S4CAM	Mod. baja	Mod. alta	Mod. baja	Mod. alto	Alto
S4CLN	Mod. baja	Mod. alta	Mod. baja	Mod. alto	Alto

Los predios se ubican en un área de colinas suaves (pendiente de 2 a 5%), con presencia de terrazas, con poca erosión, con superficie calcárea en ciertas áreas y poca pedregosidad; profundidad menor de 30 cm, con una capa de duripán continua y consistente; son de color pardo oscuro en húmedo (10YR 3/2) y pardo en seco (10YR 4/2). Separación de contraste entre horizontes abrupto y forma plana, reacción nula al HCl diluido, al NaF y a la fenolftaleína y moderada a H_2O_2; suelos de consistencia blanda en seco y muy friable en húmedo; adhesividad y plasticidad ligeras. Material parental residual, esqueleto con gravas de finas y medias. Estructura en bloques subangulares finos, abundantes y desarrollo débil. Permeabilidad moderada; escurrimiento superficial moderado; drenaje interno drenado. Raíces finas y muy finas escasas. Escasez de raíces finas y muy finas.

La fertilidad del suelo en ambas condiciones de manejo (orgánico y convencional) fue muy variable con una distribución irregular de nutrimentos. $N\text{-}NO_3^-$ de bajo a medio. Bajo contenido de Fe, Cu, Zn y Mn. La MO < 3%, aún bajo manejo orgánico.

(1) Textura. En los sitios analizados, 7 suelos presentaron textura franca (media), caracterizados por ser de ligera adhesividad, buena infiltración, mediana retención de humedad y muy baja conductividad hidráulica; los 9 suelos restantes son de textura franco arenosa (gruesa), con una ligera adhesividad, con excesiva infiltración, baja retención de humedad y baja conductividad hidráulica. (2) Densidad aparente. Los valores variaron de 1.13 a 1.36 g/ml, este parámetro indica suelos no compactados, porosidad de mediana a alta

y buena aireación, lo que permite su aireación. (3) Constantes de humedad. La CC de los suelos del área de estudio osciló entre 31 a 51%, el PMP presentó cifras que van de 16 a 37%, el PSat mostró un intervalo de 39 a 47%, mientras que los valores de HAp variaron de 11 a 12 %, el porcentaje de saturación de osciló de 49 a 55%; lo anterior indica mediana retención de agua con 13 a16% y baja conductividad hidráulica. (4) pH del suelo. Este parámetro varió entre 5.62 y 7.8, lo cual indica que la mayor parte de los sitios se ubican en torno a la neutralidad. (5) Elementos primarios. El N encontrado en siete sitios presentó bajos niveles, en ochos suelos se encontró en cantidades medias y un sitio tuvo un alto contenido. En cuanto al nivel de P, nueve suelos presentaron valores muy altos, tres un contenido alto y en dos fue moderadamente alto. Respecto al contenido de K^+ se encontraron cifras moderadamente altas en 11 lugares; el valor en tres sitios fue muy bajo y en dos los valores fueron altos. (6) Elementos secundarios (Ca^{2+} y Mg^{2+}). Al respecto, el sitio S1-OPL presentó los mayores contenidos de Ca^{2+}, mientras que el sitio S2-OIN presentó los más bajos. Sin embargo, ambos contenidos son elevados. Así, el contenido de Ca^{2+} en cinco sitios se considera moderadamente alto y en todos los demás valores medios. Respecto al contenido de Mg^{2+}, tres sitios fueron considerados altos, nueve presentaron un contenido muy alto y dos indicaron altos valores; finalmente se encontraron cinco con valores moderadamente altos. (7) Micronutrimentos. El contenido de Fe, B, Cu, Zn y Mn mostró cantidades muy variadas. El Fe varió de 6.89 a 54.39 mg/Kg; el B de 1.63 a 4.45 mg/Kg; el Zn de 0.91 a 4.85; por su parte el Cu osciló de 1.53 a 6.57 mg/Kg, mientras que el Mn varió de 17.52 a 107.99 mg/Kg. (8) Materia orgánica. Dos sitios alcanzaron 2.96 %, mientras otros dos sitios presentaron el valor más bajo (1.21%). Estos resultados indican que 4 sitios tuvieron un contenido moderadamente bajo; 3 valores medios; 2 moderadamente altos y 5 valores altos. (9) Nitrógeno total (Nt). Este parámetro se relaciona con el contenido de MO del suelo y, por tanto, los sitios con una baja cantidad de Nt se corresponden con los sitios S4-CAM Y S4-CLN; por otra parte, se halló un valor medianamente pobre en el resto de los suelos. (10) Relación C/N. Los valores con muy alta relación C/N corresponden con los sitios S3-CIN y S4-CIN; el resto de los espacios indicaron una relación alta. En todos los casos se puede interpretar como una insuficiencia de N disponible para que los microorganismos actúen, descompongan y liberen el nutrimento para las plantas. (11) Porcentaje de saturación de bases (PSB). Sólo el sitio S1-OPL tuvo un alto PSB, mientras que S2-OLN presentó un bajo nivel, el resto de los sitios alcanzaron valores medios. El Ca^{2+} es responsable de 44.6 a 60.5% de este PSB, cercano al óptimo (60-70%); la proporción de Mg^{2+} dentro del PSB varió de 18.71 a 27.81%, estando en la mayoría de los sitios arriba del intervalo óptimo (10 a 20%); finalmente, el porcentaje de K^+ fue muy alto en todos los suelos, variando de 18.53 a 26.46%, esto es, muy arriba del óptimo (2 a 5%). El contenido de Na^+ en los suelos fue bajo y no es una limitante al buen manejo a los suelos.

La sustentabilidad del suelo en correspondencia con la calidad del suelo se midió por indicadores (Lal, 1994; SQI, 1996), para lo cual se obtuvo el Peso Relativo de Factores (RWF) según las cifras de Indicadores de Calidad del Suelo usando la Puntuación Acumulativa (CR); para esto se usaron los valores de Capacidad de aireación (CA), Disponibilidad de retención de agua (DRA), CC relativa (CCR), Densidad aparente (Dap), C orgánico del Suelo (COS), Textura (Tex), Relación de absorción de sodio (SAR), Conductividad eléctrica (CE) y pH de la solución del suelo (pH), según la metodología propuesta por Lal, 1994 (Cuadro 4; 5; 6).

Después se realizó la Clasificación de Sustentabilidad del Suelo con base la Puntuación Acumulativa (CR) según 9 indicadores del Conjunto Total de Datos (TDS) y 5 indicadores del Conjunto Mínimo de Datos (MDS), Cuadro 3 (Lal, 1994).

Cuadro 4. Peso Relativo de Factores (RWF) con base a Puntuación Acumulativa (CR).

Límite	RWF	CA	DRA	Dap	CCR	RAS	COS	CE	pH	Textura
Ninguno	1	> 0.20	> 0.30	< 13	0.6-0.7	< 3	70-130	< 3	6-7	Areno limosa
Débil	2	0.18-0.20	0.20-0.30	13-14	0.5-0.6 0.7-0.75	3-6	45-70	3-5	5.8-7 5.8-6	Limoso Limo arcilloso
Moderado	3	0.15-0.18	0.08-0.20	14-15	0.4-0.5 0.75-0.8	6-12	14-45	5-7	5.4-5.8 7.4-7.8	Arcillo limoso Arena limosa
Severo	4	0.10-0.15	0.02-0.08	15-16	0.35-0.4 0.8-0.9	12-20	7.5-14	7-10	5.0-5.4 7.8-8.2	Franco Limo arenoso
Extremo	5	< 0.10	< 0.02	> 16	< 0.35 a > 0.9	> 20	< 7.5	10	< 5.0 a > 8.2	Arcilla arenosa

Cuadro 5. Clasificación de la Sustentabilidad del Suelo con base en indicadores.

Sustentabilidad del suelo	RWF	CR-TDS. Rating acumulativo de 9 indicadores del suelo	CR-MDS. Rating acumulativo de 5 indicadores del suelo
Alta sustentabilidad	1	< 16	< 9
Sustentabilidad	2	16-21	9-14
Sustentabilidad con alto uso de insumos	3	21-26	14-19
Sustentabilidad con otro uso del suelo	4	26-31	19-24
No sustentable	5	> 31	> 24

Cuadro 6. Valores de Índice Agrícola de Sustentabilidad del Suelo (IASS) en parcelas con nopal orgánico y convencional en Axapusco, Estado de México.

Sitios con manejo orgánico				Sitios con manejo convencional			
Sitio	IASS	Sitio	IASS	Sitio	IASS	Sitio	IASS
S1-OPL	3	S2-OPL	3	S3-CPL	3	S4-CPL	3
S1-OIN	2	S2-OIN	3	S3-CIN	4	S4-CIN	4
S1-OAM	3	S2-OAM	2	S3-CAM	4	S4-CAM	3

S1-OLN	3	S2-OLN	3	S3-CLN	3	S4-CLN	3

Se realizó la comparación de medias (HSD) y no hubo diferencia estadística significativa en los valores de las medias en ninguno de los sitios evaluados. Statgraphics Centurion©, 2025.

El 68.75% de los suelos tuvieron nivel 3 (sustentabilidad con alto uso de insumos); 18.75%, nivel 4 (sustentabilidad sólo con otro uso de suelo) y 12.5%, nivel 2 (sustentabilidad). A pesar del manejo orgánico, no hubo diferencias en fertilidad y sostenibilidad en los predios evaluados. El principal parámetro de impacto sobre los índices de sostenibilidad fue la escasa proporción de C orgánico de los suelos; propiciado por el tipo de cultivo y las bajas aportaciones de los productores. Se trata de zonas secas y con paso continuo de ovinos y accidentalmente hay quemas de pastos y arvenses, lo que disminuye el contenido de MO.

Conclusiones

El impacto principal sobre el IASS fue propiciado por la baja cantidad de MO propiciado por el tipo de cultivo, el pastoreo y las quemas accidentales, que impactan el cultivo, independientemente del tipo de manejo.

Al estar ubicadas las parcelas junto a carreteras de gran flujo vial hay diversas afectaciones a los cultivos de nopal.

Agroecológicamente hay diversas prácticas aplicables para mejorar las condiciones del suelo del área de estudio (cultivos de cobertera entre franjas de plantas, incremento del abonado orgánico, manejo de arvenses aprovechables, controles alternativos de plagas); pero, la situación socioeconómica y cultural, de los productores sólo permitirá implantar una opción a mediano y largo plazo.

Hasta el momento se han desarrollado los siguientes aspectos: (1) Se han detectado los puntos críticos respecto a las características físicas, químicas y de fertilidad de los suelos estudiados. (3) Se está generando una propuesta de manejo con base en los aspectos anteriores. (4) Se está realizando el análisis estadístico de los resultados. (5) Se están planeando algunos experimentos para evaluar deferentes alternativas de manejo sugeridas.

Literatura citada

Allen, P., Van-Dusen, D., Lundy, J. & S. Gliessman. (1991). Integrating social, environmental and economic issues in sustainable agriculture. American Journal of Alternative Agriculture, 6 (1): 34-39.

Askari, M. S. & N. M. Holden. (2014). Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management. Geoderma 230–231, 131–142.

Castellanos, J. Z., Uvalle B., J. X. y A. Aguilar S. (2002). Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. 2ª. ed. Colección INCAPA. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. San Miguel de Allende, Guanajuato pp. 226.

Chen, Y. D., Wang, H. Y., Zhou, J. M., Xing, L., Zhu, B. S., Zhao, Y. C. & X. Q. Chen. (2013). Minimum data set for assessing soil quality in farm land of Northeast China. Pedosphere 23 (5): 564-576.

Erkossa, T., Itanna, F. & K. Stahr. (2007). Indexing soil quality: a new paradigm in soils science research. Australian Journal Soil Research, 45, 129-137.

FAO/OMS, 2001. Evaluación conjunta FAO/OMS del Codex Alimentarius y otros trabajos de la FAO y la OMS sobre normas alimentarias. FAO. Comité de Agricultura 17º período de sesiones. 31 de marzo – 4 de abril de 2003. Roma, Italia.

Imaz, M. J., Virto, I., Bescansa, P., Enrique, A., Fernández-Ugalde, O. & D. L. Karlen. (2010). Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland. Soil Tillage Research, 107 (1): 17-25.

Lal, R. (1994). Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. Soil Management Support System, USDA-NRCS, Washington, DC. pp: 1-88.

Mejía L., F. (2006). Producción de tuna (*Opuntia* sp.) orgánica en el valle de Teotihuacán, Estado de México. 1er. Encuentro Latinoamericano y del Caribe de productoras y productores experimentadores y de investigadores en agricultura orgánica. Memoria de resúmenes. 26-29 de septiembre de 2006. Managua, Nicaragua. pp. 67-68.

NOM. (2002). NOM SUELOS-DOF-31-12-2002. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. SEMARNAT. México, D. F. 79 p.

Paz-Ferreiro, J. & S. Fu. (2016). Biological indices for soil quality evaluation: perspectives and limitations. Land Degradation Development, 27, 14-25.

Qui, Y., Darilek, J. L., Huang, B., Zhao, Y., Sun, W. & Z. Gu. (2009). Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China. Geoderma 149 (3-4): 325-334.

Rahmanipour F., Marzaioli R., Bahrami, H. A, Fereidouni, Z., & S. R. Bandarabadi. (2014). Assessment of soil quality indices in agricultural lands of Qazvin Province, Iran. Ecological Indicators, 40: 19-26.

Raiesi, F. & V. Kabiri. (2016). Identification of soil quality indicators for assessing the effect of different tillage practices through a soil quality index in a semi-arid environment. Ecological Indicators, 71: 198-207

Rodríguez, E., Peche, R., Garbisu, C., Gorostiza, I., Epelde, L., Artetxe, U., Irizar, A., Soto, M., Becerril, J. M. & J. Etxebarria. (2016). Dynamic Quality Index for agricultural soils based on fuzzy logic. Ecological Indicators, 60: 678-692.

Socorro C., A. L. (2006). Alternativas para el manejo ecológico de suelos (MES) y la nutrición vegetal. Departamento de Ciencias Agrarias. Universidad de Cienfuegos, Cuba. 21 pp.

SQI-Soil Quality Institute. (1996). Indicators for Soil Quality Evaluation. USDA Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center and the Soil Quality Institute, NRCS, USDA & the National Soil Tilth Laboratory, Agricultural Research Service. USA. 5p.

Tesfahunegn, G. B. (2014). Soil quality assessment for evaluating soil degradation in Northern Ethiopia. Applied Environment Soil Science, 15, 646502-1-15.

Zinck, J. A. & A. Farshad. (1995). Issues of sustainability and sustainable land management. Canadian Journal of Soil Science, (75): 407-412.

Piñonares de San Luis Potosí: diversidad y composición florística de un ecosistema estratégico del Altiplano Mexicano

Joaquín Parra-Álvarez[38], Ro Linx Granados-Victorino[39], Diódoro Granados-Sánchez[40], Antonio Villanueva-Morales[41]

Resumen

La composición florística de los bosques piñoneros se caracteriza por un estrato arbóreo dominado por especies del género *Pinus* L., acompañado por especies de *Juniperus* L. y *Quercus* L., y su riqueza y diversidad están determinadas por factores ambientales como la altitud, la pendiente, la exposición, tipo de suelo, temperatura y la disponibilidad de humedad. Sin embargo, actividades antropogénicas como la minería y el sobrepastoreo han reducido su área geográfica. El objetivo del presente estudio fue evaluar la composición florística y la diversidad de los bosques piñoneros presentes en el estado de San Luis Potosí mediante los índices de Margalef, Menhinick y Shannon-Weiner. Se muestrearon nueve localidades con presencia de pinos piñoneros y mediante el método de barrido florístico se registró la flora presente en diferentes estaciones del mes de septiembre de 2019 al mes de marzo de 2021. En los resultados se obtuvo una composición florística de 597 especies agrupadas en 87 familias y 272 géneros. Los índices de riqueza generales de Margalef (D_{Mg} = 77.99) y Menhinick (D_{Mn} = 13.078), así como el índice de diversidad de Shannon-Weiner (H' = 6.227) evidencian una alta diversidad florística albergada en esta asociación vegetal. La asociación con mayor riqueza y diversidad fue la dominada por *Pinus pinceana* Gordon. & Glend. Los bosques piñoneros de San Luis Potosí albergan una alta riqueza de flora, por lo que es necesario implementar estrategias que permitan su conservación y aprovechamiento sustentable.

Palabras clave: Zonas semiáridas, índices de riqueza y diversidad, *Pinus cembroides*.

[38] Departamento de Preparatoria Agrícola, Área de Agronomía, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Chapingo, Texcoco, Edo. México, México. E-Mail: jparraa@chapingo.mx
[39] Departamento de Preparatoria Agrícola, Área de Biología, Universidad Autónoma Chapingo. km 38.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Chapingo, Texcoco, Edo. México, México. E-Mail: rgranadosv@chapingo.mx
[40] División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, México. km 38.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Chapingo, Texcoco, Edo. México, México. E-Mail: dgranadoss@chapingo.mx
[41] División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, México. km 38.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Chapingo, Texcoco, Edo. México, México. E-Mail: avillanuevam@chapingo.mx

Abstract

The floristic composition of pinyon pine forests is characterized by a tree layer dominated by species of the genus *Pinus* L., accompanied by species of *Juniperus* L. and *Quercus* L. Their richness and diversity are determined by environmental factors such as altitude, slope, aspect, soil type, temperature and moisture availability. However, anthropogenic activities such as mining and overgrazing have reduced their geographic distribution. The objective of this study was to evaluate the floristic composition and diversity of pinyon pine forests in the state of San Luis Potosí, Mexico, using the Margalef, Menhinick and Shannon-Wiener indices. Nine localities with the presence of pinyon pines were surveyed, and the floristic sweep method was used to record the flora present during different seasons from September 2019 to March 2021.

The results revealed a floristic composition of 597 species grouped into 87 families and 272 genera. The overall richness indices, Margalef (D_{Mg} = 77.99) and Menhinick (D_{Mn} = 13.078), as well as the Shannon-Wiener diversity index (H' = 6.227), indicate the high floristic diversity harbored by this plant association. The association is dominated by *Pinus pinceana* Gordon & Glend. showed the highest richness and diversity values. The pinyon pines forest of San Luis Potosí harbors a high floristic richness: therefore, it is necessary to implement strategies that promote their conservation and sustainable management.

Keywords: Semi-arid zones, richness and diversity indices, *Pinus cembroides*

Introducción

La riqueza de especies constituye uno de los indicadores más importantes en el análisis de la biodiversidad, ya que refleja la capacidad que tiene una comunidad vegetal o un ecosistema para albergar diferentes taxones vegetales, los valores cuantitativos que se obtienen reflejan la variabilidad que existe entre sitios evaluados, cuya variación está determinada en su mayoría por diferentes factores ambientales, edáficos y antropogénicos (Guía-Calderón et al., 2015).

Dentro de las zonas áridas y semiáridas del altiplano mexicano se encuentran los bosques piñoneros, uno de los ecosistemas más relevantes debido a su distribución restringida entre las zonas templadas y áridas, producto de su historia biogeográfica de emigración durante las últimas glaciaciones del periodo del Pleistoceno quedando confinados en estas serranías (Parra-Álvarez et al., 2023).

Para los bosques piñoneros la diversidad florística es influenciada por la interacción de elementos florísticos de ambientes templados y xerófilos, dado que estos ecosistemas se encuentran inmersos en las serranías semiáridas del altiplano mexicano que van de los 1600 m a los 2600 m de altitud, aunado a variables ambientales como la altitud, la pendiente, el tipo de suelo, la exposición y la disponibilidad de humedad, entre otras. Esta combinación de especies genera comunidades complejas que proporcionan refugio y alimento para la fauna, así como a la población humana local (Mata-Balderas et al., 2020), además de contribuir a los procesos ecológicos y la conservación de la flora regional.

El estado de San Luis Potosí a lo largo de la historia ha basado parte de su economía central en la actividad minera, expandiendo sus fronteras en diversas regiones montañosas, principalmente en las zonas donde se encuentran los bosques de pino piñonero, derivando la apertura de caminos e instalación de infraestructura asociada a la actividad minería que en su conjunto generan grandes cambios en la fisonomía y estructura de la vegetación, así como en la cobertura forestal, representando una fuerte amenaza para su conservación dada la fragmentación del hábitat y pérdida de biodiversidad (Díaz-Reyes et al., 2020; Espinosa-Reyes et al., 2014)

Debido a lo anterior, el objetivo del presente estudio consistió en evaluar y analizar la composición, diversidad y riqueza florística de los bosques piñoneros del estado de San Luis Potosi, mediante los índices de riqueza de Margalef y Menhinick, así como el índice de biodiversidad de Shannon-Weinier, para conocer su estado de conservación.

Materiales y métodos

Área de estudio

Se muestrearon nueve localidades con presencia de piñonares ubicados en los sistemas montañosos del estado de San Luis Potosí; dichas localidades se encuentran distribuidas en los municipios de Guadalcázar (a, e, i), Zaragoza (b y c), Catorce (d), Villa de Reyes (e), Charcas (f), Mexquitic de Carmona (g) y San Luis Potosí (h) (Figura 1). El trabajo de campo se llevó a cabo en diferentes estaciones entre septiembre de 2019 y mazo de 2021.

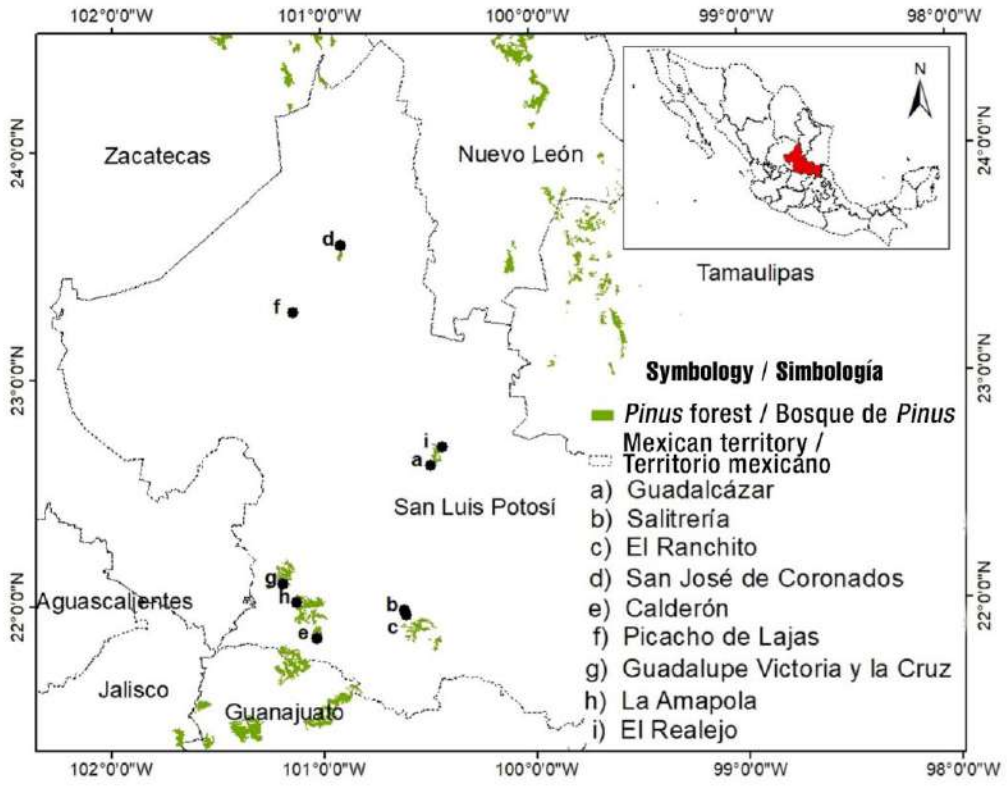


Figura 1. Ubicación de las nueve localidades con bosques piñoneros del estado de San Luis Potosí.

Composición florística

El listado florístico analizado fue previamente registrado por Parra-Álvarez et al. (2023); quienes describen detalladamente las características de las especies, la clasificación taxonómica, así como los patrones de asociación vegetal. La recolección de información se llevó a cabo en dos fases: la primera consistió en la revisión de estudios florísticos asociados a los bosques piñoneros en la zona de estudio; mientras que la segunda fase consistió en recolectar muestras botánicas para su posterior identificación taxonómica.

Índices de riqueza y diversidad

La riqueza de especies se estimó mediante la aplicación de los índices de Margalef y Menhinick y para la diversidad se utilizó el índice de Shannon-Wiener. Aunque estos índices fueron desarrollados originalmente para datos de abundancia, diversos estudios ecológicos han empleado datos de presencia-ausencia u ocurrencia de especies cuando no se dispone de conteos de individuos; particularmente en inventarios florísticos y análisis de vegetación.

Los índices de Margalef y Menhinick fueron utilizados para caracterizar la riqueza especifica relativa, considerando el número de especies registradas y el esfuerzo de muestreo representado por el número total de registros de presencia. Mientras que para el índice de Shannon-Weiner se calculó a partir de frecuencias relativas de ocurrencia de las especies.

Índice de Margalef (D_{Mg}): Se empleo para estimar la riqueza especifica, considerando el tamaño de muestra. Este índice estandariza el número de especies de la muestra y la expresa en proporción de la acumulación de especies con base al incremento de muestreo. Su cálculo se realizó mediante la siguiente expresión (Kumar et al., 2022):

$$(D_{Mg}) = \frac{S-1}{ln\,(N)} \qquad (1)$$

Donde S hace referencia al número de especies registradas y N al número total de registros de presencia.

Índice de Menhinick (D_{Mn}): este índice relaciona directamente la riqueza de especies con el total de registros obtenidos, proporcionando una mediada estandarizada que facilita comparar localidades con diferentes números de presencia. (Mulya et al., 2021). Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$D_{Mn} = \frac{S}{\sqrt{N}} \qquad (2)$$

Interpretando a S como el número total de especies registradas y a N como el número total de registros de presencia.

Índice de Shannon-Wiener (H'): este índice estima la diversidad de especies; siendo un índice ampliamente utilizado en ecología debido a su combinación de la riqueza y equitatividad de especies en la distribución de la presencia-ausencia. Las proporciones se obtuvieron a partir de la frecuencia relativa de ocurrencia de cada especie. Valores elevados de este índice indica una alta diversidad de especies (Kumar et al., 2022; Mulya et al., 2021). Esta calculado por la siguiente expresión:

$$H' = -\sum_{i=1}^{S} P_1 * ln\,(P_i) \qquad (3)$$

Donde P1 representa la proporción de registros de presencia de la especie *i* respecto al total de registros de presencia, y S corresponde al número total de especies registradas para la comunidad.

Para ambos índices los cálculos se realizaron con el paquete estadístico *Vegan* (Oksanen et al., 2018) integrado en el lenguaje estadístico de RStudio versión 2026.01.0 Build 392 (Posit Software, 2026).

Resultados y discusión

Composición florística

Se documentó una riqueza florística de 597 especies para las nueve localidades (Tabla 1) agrupadas en 87 familias botánicas y 272 géneros, reflejando una composición florística representativa de los ecosistemas templados secos, tal como lo reportan Barrera-Zubiaga et al. (2018) en la caracterización de cuatro bosques de pino piñonero del estado de Zacatecas, donde registraron una riqueza florística de 243 especies., mientras que en un estudio sobre la flora vascular del desierto Chihuahuense Villarreal-Quintanilla et al. (2017) reportaron 826 *taxa* registrados para esta área que incluye al estado de San Luis Potosí.

La composición florística de los piñonares está dominada por especies pertenecientes a las familias Asteraceae, Poaceae y Cactaceae, en conjunto agrupan aproximadamente el 37.3% de especies registradas, asimismo las familias Fabaceae y Asparagaceae contribuyen con 6.4% y 5.2% de las especies, respectivamente. Las especies piñoneras registradas fueron: *Pinus cembroides* Zucc., *Pinus johannis* Rob.-Pase., *Pinus discolor* D. K. Bailey & Hawksw., *Pinus pinceana* Gordon. & Glend. y *Pinus nelsonii* Shaw.

Especies de las familias como la Cactaceae y la Asparagaceae reflejan una gran relevancia de adaptabilidad a condiciones ambientales de aridez y muchas de ellas son endémicas de estos ecosistemas, sin embargo, las perturbaciones antropogénicas han disminuido sus poblaciones (Morales-Garduño et al., 2021).

Tabla 1. Riqueza florística y asociación vegetal por sitio estudiado

Sitio	Riqueza/Especies	Asociación Vegetal
Guadalcázar	363	*Pinus pinceana*-Yuca
El Realejo	181	*Pinus nelsonii*-*Quercus* spp.
Salitrería	213	Piñón-Encino
El Ranchito	284	Piñón-*Juniperus flaccida* Schltdl.
San José de Coronados	295	Piñón-Yuca
Calderón	198	Piñón-Encino
Picacho de Lajas	167	*Pinus johannis*-*Quercus* spp.

Guadalupe Victoria y la Cruz	196	Piñón-Yuca
La Amapola	187	Piñón-Yuca
Riqueza acumulada	597	

Índices de riqueza y diversidad

Los valores más altos de los índices de riqueza de Margalef y Menhinick, así como del índice de diversidad de Shannon-Weiner (Tabla 2), se registraron en la localidad de Guadalcázar con presencia de bosques de *P. pinceana*. Este comportamiento se puede atribuir a que en esta localidad se registró el mayor número de especies y muchas de ellas son exclusivamente asociadas a *P. pinceana*; lo cual contribuyó significativamente al incremente de la diversidad observada. Dado que esta especie de pino tiene una afinidad de establecerse y desarrollar en cañadas (Parra-Álvarez et al., 2023; Sánchez-Castillo et al., 2022).

Los valores de los índices de riqueza y diversidad siempre serán más altos en los sitios donde se registre mayor número de especies, tal como lo mencionan Delgado et al. (2017) en su estudio sobre la composición florística y caracterización estructural del matorral desértico micrófilo en Galeana Nuevo León, donde obtuvieron valores de 1.98 para H´, de 3.39 para D_{Mg} y de 0.79 para D_{Mn} para el sitio La Hediondilla en el que se registró el valor más alto (35 especies).

En contraste, para el bosque de *Pinus johannis* de la localidad de Picacho de Lajas los valores obtenidos de los índices fueron los más bajos (Tabla 2), dado que fue el sitio donde se registró menor número de especies, como consecuencia de un suelo somero y poca disponibilidad de humedad, lo cual influye en que se puedan establecer y desarrollar mayor cantidad de especies debido al alto estrés ambiental (Valdez Marroquín et al., 2018).

Tabla 2. Índices de riqueza y diversidad para las nueve localidades estudiadas

Sitio	Margalef	Menhinick	Shannon-Weiner
Guadalcázar	61.41	19.05	5.89
El Realejo	34.62	13.45	5.2
Salitrería	39.54	14.6	5.36
El Ranchito	50.1	16.85	5.65
San José de Coronados	51.7	17.18	5.69
Calderón	37.25	14.07	5.29
Picacho de Lajas	32.44	12.92	5.12
Guadalupe Victoria y la Cruz	36.94	14	5.28

La Amapola	35.56	13.68	5.23
Índice general	79.99	13.078	6.227

Conclusiones

La composición florística registrada para los bosques piñoneros de San Luis Potosí fue de 597 especies, lo cual evidencia un elevado número de especies asociadas a climas áridos y semiáridos del altiplano mexicano. Su importancia de estos bosques radica como reservorios de biodiversidad vegetal contribuyendo a la conservación y heterogeneidad ecológica de estas comunidades vegetales.

Respecto al análisis de riqueza y diversidad entre localidades hubo diferencias, destacando la localidad de Guadalcázar por presentar los valores más altos y Picacho de Lajas por presentar los valores más bajos. Esto está fuertemente relacionado con factores ambientales, características edáficas y la heterogeneidad del sitio, así como el estado de conservación.

Las especies piñoneras registradas en el área de estudio fueron *Pinus cembroides, Pinus johannis, Pinus discolor, Pinus pinceana* y *Pinus nelsonii*. De las cuales en base a la NOM-059-Semarnat, *P. johannis* se encuentra en un estatus de Protección especial (Pr) y *P. pinceana y P. nelsonii* son clasificados como especies en peligro de extinción (P).

La presencia de especies exclusivas de algunas localidades es relevante para implementar estrategias de conservación de múltiples poblaciones de este ecosistema, ya que cada una de ellas aporta diferentes elementos florísticos que incrementan la diversidad regional.

Los piñonares son ecosistemas estratégicos debido a su asociación con especies de matorral xerófilo y bosque templado, reflejando un papel importante como una zona de transición ecológica, favoreciendo la conectividad del paisaje ecológico. Así como a la conservación de la biodiversidad del altiplano mexicano.

Sin embargo, la intensificación de la actividad minera pone en riesgo su continuidad y su fragmentación ecológica, reduciendo los servicios ecosistémicos que proporcionan. Debilitando de manera general la resiliencia de estas comunidades vegetales.

Literatura citada

Barrera-Zubiaga, E. J. E., Granados-Sánchez, D., Granados-Victorino, R. L., & Luna-Cavazos, M. (2018). Caracterización de Cuatro Bosques de Pino Piñonero del Estado de Zacatecas, México. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, *24*(3), 275–296. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.03.018

Delgado, G., Pournavab, F., Domínguez, R., Lucio, G., Antonio, M., & Rodríguez, G. (2017). Composición florística y caracterización estructural del matorral desértico micrófilo en Galeana, Nuevo León. *Revista mexicana de ciencias forestales*, *8*(39), 83–98. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63454555007

Díaz-Reyes, C., Granados-Sánchez, D., Uribe-Gómez, M., Rodríguez-Trejo, D. A., & Granados, V. R. L. (2020). Ordenación de la vegetación de las sierras y llanuras occidentales municipio de Catorce, San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *11*(4), 713–725. https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2459

Espinosa-Reyes, G., González-Mille, D. J., Ilizaliturri-Hernández, C. A., Mejía-Saavedra, J., Cilia-López, V. G., Costilla-Salazar, R., & Díaz-Barriga, F. (2014). Effect of mining activities in biotic communities of Villa de la Paz, San Luis Potosi, Mexico. *BioMed Research International*, *2014*. https://doi.org/10.1155/2014/165046

Guía-Calderón, M., Rosales-García, J. J., Guzmán-Cabrera, R., González-Parada, A., & Álvarez-Jaime, J. A. (2015). El área de distribución de las especies: revisión del concepto. *Acta Universitaria*, *25*(2), 40–50. https://doi.org/10.15174/au.201

Kumar, P., Dobriyal, M., Kale, A., Pandey, A. K., Tomar, R. S., & Thounaojam, E. (2022). Calculating forest species diversity with information-theory based indices using sentinel-2A sensor's of Mahavir Swami Wildlife Sanctuary. *PLoS ONE*, *17*(5 May). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268018

Mata-Balderas, J. M., Hernández-Cárdenas, S. E., Alanís-Rodríguez, E., & Mora-Olivo, A. (2020). Riqueza, composición y abundancia de especies en una comunidad vegetal ribereña en el río Santa Catarina, Monterrey, Nuevo León. *Biología y Química*, *14*(2), 06–20. https://doi.org/doi.org/10.29059/cienciauat.v14i2.1268

Morales-Garduño, L., Solano, E., Villaseñor, J. L., & Montaño-Arias, G. (2021). Panbiogeografía de los matorrales de la Región Xerofítica Mexicana. *Botanical Sciences*, *99*(3), 611–627. https://doi.org/10.17129/botsci.2773

Mulya, H., Santosa, Y., & Hilwan, I. (2021). Comparison of four species diversity indices in mangrove community. *Biodiversitas*, *22*(9), 3648–3655. https://doi.org/10.13057/biodiv/d220906

Oksanen, J., Blanchet, F. G., Friendly, M., Kindt, R., Legendre, P., Mcglinn, D., Minchin, P. R., O'hara, R. B., Simpson, G. L., Solymos, P., Henry, M., Stevens, H., Szoecs, E., & Maintainer, H. W. (2018). *Title Community Ecology Package*. https://www.researchgate.net/publication/313502495_Vegan_Community_Ecology_Package

Parra-Álvarez, J., Granados-Sánchez, D., Granados-Victorino, R. L., & Villanueva-Morales, A. (2023). Caracterización estructural y clasificación de los bosques piñoneros de San Luis Potosí, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Del Ambiente*, *29*(1), 61–98. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.03.021

Posit Software, PBC. (2026). *RStudio* (Version 2026.01.0 Build 392). https://posit.co/homepage-b/

Sánchez-Castillo, C., Wehenkel, C., Golubov, J., Vanoye-Eligio, V., Martínez-Gallegos, R., De la Rosa-Manzano, E., Torres-Castillo, J. A., & Martínez-Ávalos, J. G. (2022). Estructura y composición de los bosques de Pinus pinceana Gordon (Pinaceae), en el noreste de México. *Botanical Sciences*, *100*(4), 1058–1072. https://doi.org/10.17129/botsci.2946

Valdez Marroquín, C. G., Guzmán, M. A., Valdés, A., Forougbakhch, R., Alvarado, M. A., & Rocha, A. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación del matorral espinoso tamaulipeco con condiciones prístinas en el noreste de México. *Revista de Biología Tropical*, *66*(4), 1674–1682. https://doi.org/10.15517/rbt.v66i4.32135

Villarreal-Quintanilla, J. A., Bartolomé-Hernández, J. A., Estrada-Castillón, E., Ramírez-Rodríguez, H., & Martínez-Amador, S. J. (2017). El elemento endémico de la flora vascular del Desierto Chihuahuense. *Acta Botanica Mexicana*, (118), 65–96. https://doi.org/10.21829/abm118.2017.1201

Sinergia entre restauración y aprovechamiento de leña del tepozán (*Buddleia cordata* H. B. K.)

Mario Castelán Lorenzo[42], Jorge Antonio Bustillos Herrera[43], Mercedes María Cuenca Condoy

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la respuesta a la poda de ramas de tepozán (*Buddleia cordata* H.B.K), al ser de rápido crecimiento, tolerante a la sequía y crecer en suelos erosionados, y principalmente considerada como especie potencialmente útil para la recuperación de zonas degradadas. Se ubicó un ejemplar de tepozán al cual se le cortaron las ramas, considerando un grosor apto como leña y se midió la altura y el diámetro de base de los nuevos brotes por un año. Después de cuatro meses se contaron 22 brotes posterior al corte inicial, y después de ocho meses de monitoreo se incorporaron 15 brotes más de menos de 1 cm de diámetro de base, lo cual indica que el tepozán tiende a emitir rebrotes durante todo el año. Después de un año de evaluar los brotes, el 60% superaron los 3 cm de diámetro de la base, sin embargo, desde los seis meses pueden cortarse los brotes que hayan superado este diámetro para que los restantes puedan mejorar el crecimiento por efecto del aclareo de ramas. El tepozán es considerado un árbol noble por su poca demanda de nutrientes, potencial para rehabilitar zonas degradadas y de rápido crecimiento, su potencial como árbol para leña es alto ya que en un año los brotes pueden crecer de tal manera que alcanzan hasta 4.5 cm de grosor en su base y se pueden cortar sin derribar al árbol completo con lo que se estaría promoviendo el aprovechamiento sustentable de esta especie.

Palabras clave: *Buddleia cordata***,** evaluación de brotes, especie multipropósito, restauración ecológica.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the response to branch pruning of the tepozán (*Buddleia cordata* H.B.K.), as it is fast-growing, drought-tolerant, and grows in eroded soils, above a potentially useful species for the restoration of degraded areas. A tepozán specimen

[42] Universidad Autónoma Chapingo. Centro de Investigación en Biología, Educación Ambiental y Agricultura Orgánica. Área de Agronomía. Km. 38.5 Carr. México-Texcoco, Chapingo, Méx. Correo: mcastelanl@chapingo.mx. mcuencac@chapingo.mx

[43] Universidad Autónoma Chapingo. Academia de Sistemas de Producción Forestal. Área de Agronomía. Km. 38.5 Carr. México-Texcoco, Chapingo, Méx. Correo: jbustillosh@chapingo.mx

was located, and its branches were cut, leaving only the main one, with a thickness sufficient to be considered firewood. New shoots were measured for one year, along with their height and base diameter. Four months after the initial cut, 22 shoots were counted, and after eight months of monitoring, 15 more shoots with a base diameter of less than 1 cm were added, indicating that the tepozán tends to sprout throughout the year. After one year of shoot evaluation, 60% exceeded 3 cm in base diameter. However, after six months, shoots that have exceeded this diameter can be cut so that the remaining shoots can improve growth through branch thinning. The tepozán is considered a noble tree due to its low nutrient demand, potential for rehabilitating degraded areas, and rapid growth. Its potential as a firewood tree is high, as shoots can grow up to 4.5 cm thick at their base in one year and can be cut without felling the entire tree, thus promoting the sustainable use of this species.

Keywords: *Buddleia cordata*, shoot evaluation, multipurpose species, ecological restoration

Introducción

La FAO (2020) señala que los recursos forestales se agotan a una velocidad alarmante, a una tasa de destrucción de 4,7 millones de ha de bosque por año en el período 2010-2020, muchos de los cuales son tropicales. Las causas son bastas, pero destacan el cambio de uso de suelo a ganadería, expansión agrícola, urbanización, entre otras, donde figura el consumo de leña, sobre todo en las zonas rurales (Bello-Román et al.2023). Por otra parte, el uso de leña como combustible aun es común en varios países, entre ellos México, que, para cortar leña, en muchos lugares realizan la práctica del anillado o "cinchado" que interrumpe el flujo de savia para que el árbol se seque en pie y después derribarlo.

En otras regiones rurales que depende de leña en su totalidad, derriban al árbol completo en verde y siguen el proceso de secado de madera, troceado, apilado y secado, pero en la mayoría de las veces el árbol cortado no tiene la capacidad de rebrotar y, si lo hace, su crecimiento es muy lento, Andrade-Limas et al. (2025) señalan que la extracción diaria de leña disminuye la densidad arbórea afectando negativamente los bosques. La CONAFOR (s.f.) señala que el uso de madera para energía (leña y carbón vegetal) es de 38 millones de metros cúbicos al año por ello, sugiere que la leña se obtenga sólo de árboles secos o muertos de manera natural o ramas de árboles vivos adultos.

En la montaña de Guerrero, se encontró que el 32.3 % de las personas recogen leña seca y cortan el árbol, 26.4 % talan el árbol, el 23.5 % de las personas recolectan leña seca y el 17.6 % poda ramas verdes y recoge materia seca; los habitantes señalaron que prefieren recoger la leña seca, pero casi no está disponible (Mozo y Silva, 2022). Por lo anterior, deben buscarse

opciones de árboles de crecimiento rápido para obtener leña, puesto que continúa empleándose en muchos hogares de México tanto rurales como urbanos. Así, uno de estos árboles es el tepozán (*Buddleia cordata*) que se caracteriza por crecer en ambientes muy pobres en cuanto a nutrientes de suelo, profundidad, entre otros.

Las características del tepozán es que es de rápido crecimiento, tolerante a la sequía, crece en suelos erosionados y pobres en nutrientes y es considerada una especie potencialmente útil para la recuperación de zonas degradadas, tal y como lo reportan Ramos et al. (2012) en el Sur de la Ciudad de México. En medicina tradicional se tiene registro sobre su empleo para diversas enfermedades, atribuyéndole propiedades analgésicas, eupépticas, diuréticas y antisépticas; además de propiedades cicatrizantes y antibacterianas por parte de raíces, hojas, corteza y semillas (Hernández-Pasteur et al. 2019).

Por lo anterior, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el crecimiento de brotes de tepozán en respuesta a la poda por un periodo de un año comparando el diámetro de base y altura en tres periodos de 4 meses con fines de obtención de leña y su potencial como árbol empleado en restauración ecológica.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en Texcoco, Estado de México, para lo cual se ubicó un ejemplar de tepozán al que se le realizaron cortes de ramas con un grosor suficiente para ser considerado como leña (de 3 a 5 cm de diámetro de base). La fecha inicial de poda fue en junio de 2024, fecha en la cual, las lluvias favorecen el crecimiento de las especies vegetales, tomando en cuenta las Normas para la poda de la Asociación Mexicana de Arboricultura y la International Society of Arboriculture (SEDEMA, 2023).

Se evaluaron los nuevos brotes que surgieron a partir del tratamiento inicial del corte de ramas (podas) realizando mediciones del diámetro de la base y altura cada 4 meses por un periodo de un año. Las mediciones se realizaron en los meses de octubre, febrero y nuevamente en junio de 2025.

Como materiales se emplearon: equipo de poda y corte consistente en serruchos curvos, tijeras, machetes, extensión de sierras podadoras, cuerda, lentes de protección, así como formatos de concentración de datos, vernier graduado en mm, flexómetro y cámara fotográfica.

Análisis de la información

Las variables consideradas y medidas fueron el diámetro de base de la rama (grosor) y la altura (largo), con las que se generaron gráficos de las tendencias de crecimiento de los brotes. Se documentó la información disponible del tepozán en relación con los aspectos ecológicos del ejemplar bajo estudio y su potencial como árbol empleado en restauración ecológica.

Resultados y discusión

El tepozán se encuentra ampliamente distribuido en México, principalmente en el Altiplano, extendiéndose hasta Guatemala. Se desarrolla en una gran variedad de hábitats, sobre todo en lugares con vegetación secundaria, parcelas de cultivo y ambientes urbanos de clima templado subhúmedo y templado subhúmedo con lluvias en verano, así como semiseco templado con lluvias en verano; en rangos de temperaturas que van desde los 6.5° hasta los 22 º C y en altitudes de 1400 a 3200 m (Blanco, 2023).

Las figuras 1 y 2 muestran los diámetros de base y altura de los brotes de tepozán a 4, 8 y 12 meses de crecimiento identificando en total 22 brotes. De ellos, el incremento promedio en diámetro de la base de las ramas fue de 2.5 cm y el incremento promedio en altura fue de 1.9 m; así, el 60% de los brotes alcanzaron y superaron los 3 cm de diámetro basal y el 70% superaron los 2.5 m de altura. Se observa que el mayor crecimiento de los brotes se presentó durante el invierno (noviembre a febrero, color en tono naranja), tanto en el diámetro de base como en la altura, a diferencia del crecimiento en raíces de estacas que, de acuerdo con Ramos et al. (2012), en un estudio sobre el enraizamiento de estacas de tepozán, éste fue mayor en la temporada de lluvias. En los meses de marzo a junio se registró un crecimiento moderado, 0.7 cm en diámetro basal y 0.6 m en altura, pero ya con las características adecuadas para cortarse y poder emplearse como leña. Al cortarlas, se incorporan los brotes nuevos que tienden a emitirse, es decir, después de los ocho meses de evaluar el crecimiento se encontraron 15 brotes adicionales de menos de 1 cm de diámetro de base, lo cual indica que el tepozán tiende a emitir rebrotes durante todo el año; por ello, pueden comenzar a podarse los brotes que superen los 2.5 cm de diámetro basal desde los 6 meses, ya que el cortarlos permitirá liberar espacio y competencia para la incorporación del crecimiento en los nuevos brotes.

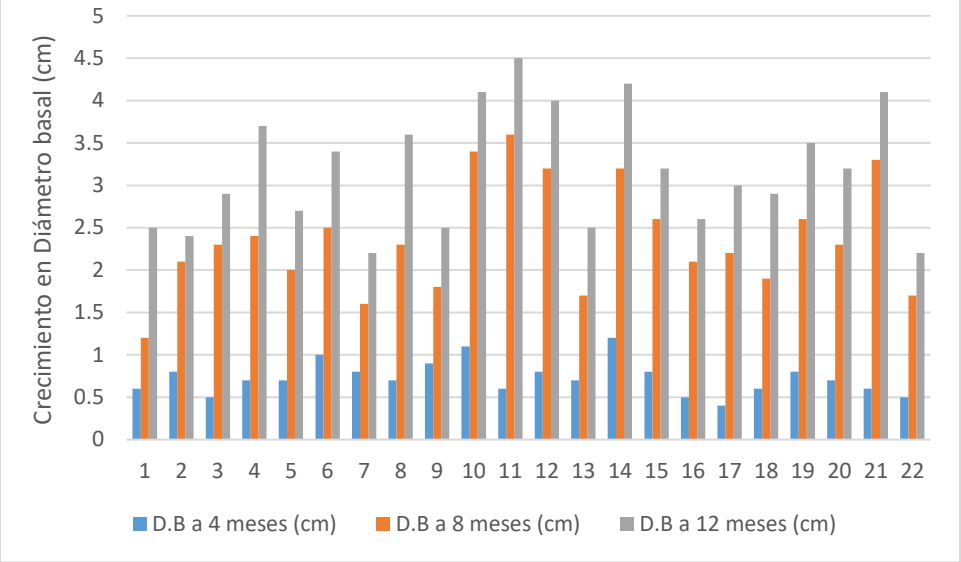


Figura 1. Crecimiento en diámetro de base de brotes de tepozán a un año.

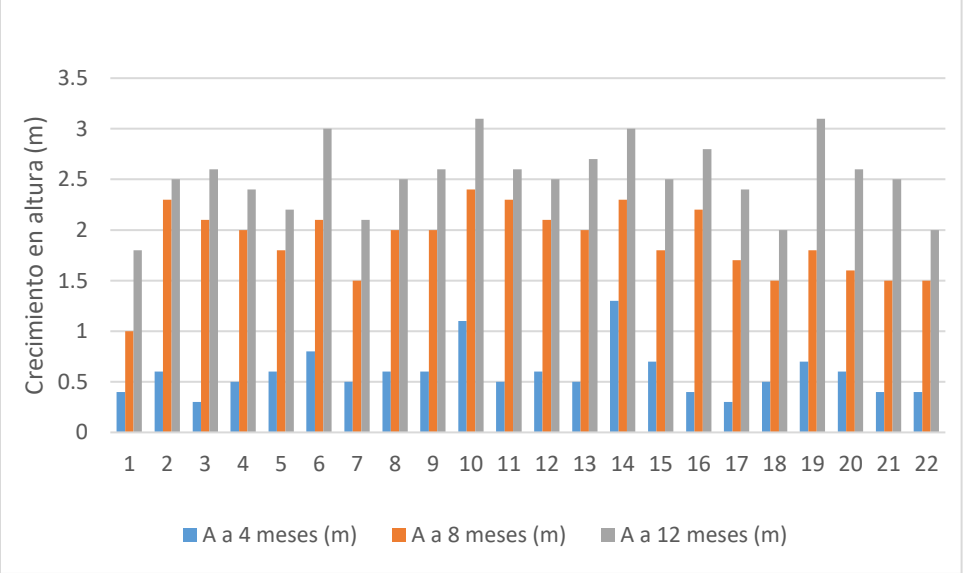


Figura 2. Crecimiento en altura de brotes de tepozán a un año.

Al realizar la regresión lineal se encontró que la relación entre diámetro de base y altura no es estadísticamente significativa con un valor de p menor a 0.05 (p=0.19), lo que indica que el diámetro basal mayor de las ramas no necesariamente indica que son las ramas más altas, tal y como se observa en la figura 3.

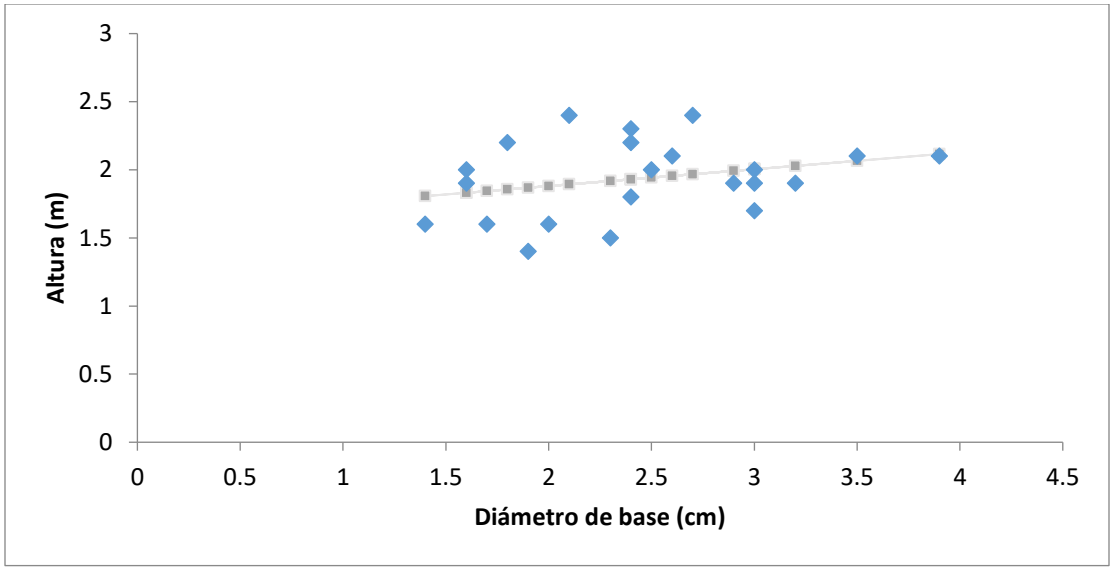


Figura 3. Ajuste de tendencia lineal de regresión entre diámetro de base y altura de brotes de tepozán.

Mendoza (2002) evaluó el crecimiento de 300 plantas de *Buddleia cordata* elegidas al azar para medirles mensualmente la altura (de la base del tallo al ápice), el número de hojas y el número de ramas. Como resultados obtuvo que la altura promedio de las 300 plantas fue de 4.3 cm, el número promedio de hojas fue 6.3 y el número promedio de ramas fue 1.8. Durante los meses secos, de marzo a mayo, tanto la altura como el número promedio de hojas disminuyeron, debido a la muerte del ápice dominante, durante la época de lluvias (junio a octubre) algunas plantas activaron sus meristemos laterales produciendo ramas y hojas, a diferencia de los resultados obtenidos en el presente estudio.

El tepozán como árbol empleado en restauración ecológica

Según Calva y Pavón (2018), la restauración ecológica es el estudio y la práctica de la recreación de ecosistemas en funcionamiento y cuando es posible, de la reintroducción de

especies históricamente asociadas con tales ecosistemas. El proceso de restaurar ecosistemas dañados requiere la aplicación de teorías referidas a la sucesión ecológica y biología de poblaciones, con fundamentos derivados de la genética y la teoría de selección natural, capacidad adaptativa y procesos de coevolución, mutualismos, extinción y recolonización. Además, señala que una de las prácticas primarias en la restauración ecológica es el restablecimiento de poblaciones localmente extintas; aunque dicho proceso se complica al combinar la reintroducción de poblaciones pertenecientes a especies que ocupan distintos niveles tróficos.

El objetivo final de la restauración ecológica es reconstruir el ecosistema que ha sufrido perturbaciones derivado de la actividad humana involucrando atributos de estructura, composición, función y persistencia; recuperar las condiciones ambientales que había antes en el sitio pero que se vieron afectados en forma negativa (Sol *et al*; 2002). Es justo en este proceso donde muchas veces, en ocasiones intencionales, se ignora a las especies clave como el tepozán, al no tener un valor como especies maderable. De hecho, varios proyectos de restauración ecológica en México se han basado en la plantación de especies vegetales cualesquiera, con el único propósito de retener el suelo de la erosión, reduciéndose a una visión simplista de reverdecer un área, sin considerar que las complejas interacciones entre múltiples especies nativas, son lo que da a los ecosistemas sus características y propiedades, como la estructura, composición, función, adaptabilidad, resistencia y resiliencia ante cambios ambientales y sin duda, sus opciones de evolución continua (Calva y Pavón, 2018).

Además de lo anterior, la sinergia entre restauración y aprovechamiento forestal del tepozán como especie dendroenergética es posible, ya que se cumplen los siguientes parámetros y cualidades de esta especie endémica de México, de acuerdo con Vanegas (2017):

Atributos biológicos y ambientales: es de fácil propagación por semilla, es de crecimiento rápido, resistente a condiciones limitantes de suelo como altamente erosionados, baja fertilidad, suelos compactados, se adapta a suelos salinos o ácidos, requiere poca materia orgánica, resistente a la sequía y altamente resistente a la contaminación atmosférica en ciudades.

Usos adicionales a su efecto restaurador: medicinal, recreativo, leña, celulosa, ornamental, atracción de polinizadores, es clave en el ciclo de vida de la mariposa *Chlosyne ehrenbergii*, endémica de México, nodriza para el crecimiento de algunas especies de encino como *Quercus rugosa*, resiste la poda casi total.

Romero et al. (2003) al estudiar la capacidad de germinación y crecimiento de semillas de tepozán, señalan que esta especie es de fácil germinación y crecimiento, además de bajos requerimientos ambientales, ubica la leña de tepozán con un alto poder calórico, aunque de baja calidad, pero considera la madera como buena para pulpa para papel. Al igual Cruz-Cruz y Guzmán-Pozos (2019) reportan una alta viabilidad y germinación en semillas de tepozán, arriba del 90% tanto con tratamiento pregerminativo como sin él, señalando la bondad de esta especie como apta en trabajos de rehabilitación ecológica.

El tepozán es preferido por muchos agricultores por la sombra que proporcionan, sus propiedades medicinales y por supuesto, para leña, quedando en segundo orden de importancia después del agave por agricultores de Adolfo López Mateos, Tlaxcala, empleándolo como árbol intercalado con cultivos agrícolas y frutales (Callo, 2013). Sin embargo, Alvarado et al. (2018) señalan que como especie maderable es poco valorada, y aún como leña, no se le ha dado importancia debido a su baja calidad, pero en algunas comunidades rurales como Xichú, Guanajuato, las amas de casa la usan en gran cantidad debido a la fuerte presión hacia las especies consideradas como buenas productoras de leña, al grado de que muchas de ellas están en riesgo de extinción como el madroño y encino.

Muñoz (2025) encontró un mayor vigor al establecerla como especie para recuperación de terrenos erosionados junto con cedro blanco (*Cupressus lusitanica*), maguey pulquero (*Agave salmiana*), nopal (*Opuntia spp*.), y retama (*Senna multiglandulosa*), recomendándola como especie para restauración de áreas degradadas. La Secretaría de Medio Ambiente de la ciudad de México reporta al tepozán como una especie altamente resistente a la contaminación atmosférica en ciudades, por lo que recomiendan su establecimiento como parte del arbolado urbano (SMA, s.f.).

Complementando lo anterior Flores (2004) señala que el tepozán es una especie capaz de colonizar espacios perturbados con altos niveles de degradación, lo que lo hace un árbol idóneo para establecerlo como árbol pionero en un proceso de restauración ecológica, indica que, como especie nodriza, *Quercus rugosa* se desarrolla mejor bajo la cobertura del tepozán y su aporte continuo de hojarasca es importante para la formación de suelo, además de alojar una gran variedad de herbívoros y polinizadores.

El tepozán como especie nativa de México, además de su importancia y potencial como productora de leña, se debe promover su protección, con ello, basta con podar los árboles, y esperar a que emita rebrotes y una vez que éstos han crecido, desde los seis meses del tratamiento de poda se pueden cortar nuevamente y emplearse como leña, de esta manera, se estaría promoviendo el aprovechamiento sustentable del tepozán. Aunque la leña del tepozán

tiene baja densidad, su bajo porcentaje de humedad y alto calor de combustión hace que se queme de forma rápida y ello permite que libere una gran cantidad de humo sin formar brazas, por tal razón no se considera como leña de buena calidad (Alvarado et al. 2018), sin embargo, según testimonios de varias amas de casa, la utilizan por su alta capacidad calorífica y la recomiendan como leña iniciadora de fuego.

En el ejemplar evaluado se observó la importancia ecológica que señala Juan (2016), quien menciona que la mariposa *Chlosyne ehrenbergii*, endémica de México, se alimenta de su follaje. Esta mariposa se observó en estado de pupa y adulto a finales del mes de octubre, por lo que puede alimentarse del follaje y completar su ciclo biológico en su totalidad hasta el corte de los brotes a principios de junio del siguiente año, dejando follaje suficiente para su desarrollo, por lo que es importante la protección de la especie.

Conclusiones

El potencial del tepozán como árbol para leña es alto ya que en un año los brotes crecieron de tal manera que alcanzaron hasta 4.5 cm de grosor en su base.

Es posible podar todos los brotes del árbol al mismo tiempo un año después del tratamiento inicial, puesto que volverán a surgir nuevos brotes sin dañar al árbol padre. No obstante, a partir de los seis meses ya se pueden cortar aquellos que superen los 2.5 cm de diámetro basal para incorporar nuevas ramificaciones si así se desea

Al ser de rápido crecimiento, se puede utilizar en áreas degradadas como estrategia de rehabilitación inicial, y en el corto y mediano plazo se pueden aprovechar las ramas como combustible sin necesidad de cortar el árbol en su totalidad, puesto que resiste altamente las podas.

Es importante considerar al tepozán como hospedero de mariposa *Chlosyne ehrenbergii*, por lo cual, deben dejarse algunas ramas del tepozán sin cortar, para que complete su ciclo biológico sin alterarlo.

Literatura citada

Alvarado, M. S. V., Álvarez, S. E., Maldonado, T. R., Sánchez, V. A. S. (2018). Consumo de leña en México: hábitos de uso, problemática asociada y alternativas sostenibles de solución. En M. E. Álvarez-Sánchez y A. Vázquez-Alarcón (Eds.) Agroforestería para la conservación de los recursos naturales y productividad (pp. 64-87). Universidad Autónoma Chapingo.

Andrade-Limas, E. Del C., Navarro-López, V., Treviño-Carreón, J., Ventura-Houle, R. y Macías-Hernández, B. A. (2025). Impacto ecológico por el uso de leña en una comunidad de alta montaña en Tamaulipas, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, *22*(1), 1-18. https://doi.org/10.22231/asyd.v22i1.1435

Bello-Román, M., García-Flores, A., Colin-Bahena, H., Román-Montes de Oca, E. y Beltrán-Rodríguez, L. (2023). Variación en el consumo de leña y factores que lo determinan en una comunidad campesina al suroeste del estado de Morelos, México. *Botanical Sciences*, *101*(1), 149-163.https://doi.org/10.17129/botsci.3147

Blanco, L. (14 de noviembre de 2023). Tepozán. Lifeder. Recuperado de https://www.lifeder.com/tepozan/

Callo, C. D. (2013). Prácticas agroforestales y especies de uso múltiple para la rehabilitación y conservación de suelos volcánicos en Adolfo López Mateos, Tlaxcala: percepción de los agricultores. *Revista Sociedades Rurales, producción y medio ambiente* 13(26), 117-134. https://sociedadesruralesojs.xoc.uam.mx/index.php/srpma/article/view/248

Calva, S., K. & Pavón, N. P. (2018). La restauración ecológica en México: una disciplina emergente en un país deteriorado. *Madera y bosques*, *24*(1), 1-11. https://doi.org/10.21829/myb.2018.2411135

Camacho, M. D., Hernández, P. S. I. y Morfín, L.L. (2009). Tepozán (Buddleia cordata). UNAM. Proyecto PAPIME PE205907.

CONAFOR. (s.f.). Instructivo para el aprovechamiento de leña en comunidades rurales. Gerencia de Desarrollo Forestal. https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/Manual-de-la-Lena.pdf

Cruz-Cruz, E. y Guzmán-Pozos, A. M. (2019). *Especies nativas para la restauración ecológica: características de las semillas*. Folleto Técnico No. 109. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Zacatepec, Morelos.

FAO. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 – Principales resultados*. Roma. https://doi.org/10.4060/ca8753es

Flores, V. J. C. (2004). Estudio demográfico del tepozán (*Buddleia cordata* Kunth) en el Ajusco medio. Universidad Nacional Autónoma de México. https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000337769/3/0337769.pdf

Hernández-Pasteur, G., Silva-Bermúdez, P. S., Reyes-Chilpa, R., V. H. y Soto-Hernández, M. (2019). Evaluación in vitro de la actividad cicatrizante y antibacteriana de extractos de *Buddleja cordata* Kunth y *Vismia baccifera* (L.) Triana & Planch. *Revista fitotecnia mexicana*, *42*(2), 93-99. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802019000200093&lng=es&tlng=es.

Juan P. J. I. (2016). Análisis del espacio geográfico y el paisaje de un campus universitario mexicano. Cerro de Coatepec, Universidad Autónoma del Estado de México. *Revista Terra Nueva Etapa*, 32 (52), 71-102. Disponible en: http://hdl.handle.net/20.500.11799/65791

Mendoza, H. P. E. (2002). Sobrevivencia y crecimiento de los estadios iniciales de *Buddleia cordata* (tepozan) en ambientes contrastantes del Ajusco medio, D.F. México.

Mozo, O. A. y Silva, A. M. (2022). Caracterización del aprovechamiento de leña en una comunidad *Me'phaa* de la Montaña de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*,13(70). DOI: 10.29298/rmcf.v13i70.1263

Muñoz, S. A. (2025). *Estrategias para la restauración de suelos erosionados del fraccionamiento Bosque Real en Huasca de Ocampo, Hidalgo*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/jspui/bitstream/231104/6264/1/ATD726.pdf

Ramos P. R., Orozco S. A., Sánchez C. M. E., y Barradas L. V. (2012). Propagación vegetativa de especies nativas potencialmente útiles en la restauración de la vegetación de la ciudad de México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 83:3, 809-816. Doi:10.7550/rmb.21610

Romero R., S., Aguilar R., S., y Rojas Z., E. C. (2003). *Buddleja cordata* H.B.K. ssp. cordata (Buddlejaceae): propagación y anatomía de la madera. *Revista Polibotánica*, (16), 63-77. https://www.polibotanica.mx/ojs/index.php/polibotanica/article/view/675

SMA. (s.f.). Manual técnico para el establecimiento y manejo integral de las áreas verdes urbanas del Distrito Federal. Secretaría de Medio Ambiente. Dirección de Reforestación Urbana. http://centro.paot.org.mx/documentos/sma/manual_manejo_areas_verdes_folleto_practico.pdf

Sol, S. A., Vega, G. M., & Cruz, A. J. (2002). Modelo para la restauración ecológica de áreas alteradas. *Kuxulkab'*, *7*(14), 48–60.

Vanegas López, M. (2016). Manual de mejores prácticas de restauración de ecosistemas degradados, utilizando para reforestación solo especies nativas en zonas prioritarias. Informe final dentro del proyecto GEF 00089333 "Aumentar las capacidades de México para manejar especies exóticas invasoras a través de la implementación de la Estrategia Nacional de Especies Invasoras". CONAFOR, CONABIO, GEF-PNUD. México. https://www.biodiversidad.gob.mx/media/1/especies/Invasoras/files/comp1/Manual_reforestacion_utilizando_especies_nativas.pdf

TEMÁTICA 9. ECOLOGÍA, FAUNA SILVESTRE Y CONSERVACIÓN

Áreas prioritarias para la conservación de la flora arbórea templada en Michoacán

José Roberto Morales-Vásquez[44], Andrés Torres-Miranda[45], Carlos Méndez-Inocencio

Resumen

Los bosques templados de Michoacán enfrentan una creciente presión por el cambio de uso de suelo, los incendios y la urbanización, lo que amenaza su alta diversidad arbórea. El objetivo de este estudio fue identificar áreas prioritarias para la conservación de 208 especies arbóreas con afinidad templada, mediante el análisis de su riqueza, rareza, rareza estricta, y evaluando su traslape con las Áreas Naturales Protegidas (ANP). Se generó una matriz de presencia-ausencia en una cuadrícula de hexágonos de 64 km². La rareza se calculó a partir de las áreas de distribución completas de cada especie, y la rareza estricta consideró las especies con distribución más restringida. Los resultados muestran que la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) concentra la mayor riqueza (172 especies), destacando las regiones de Morelia y Uruapan como las de máxima prioridad, ya que su protección (320 km²) resguardaría el 71 % de las especies. En la Sierra Madre del Sur (SMS), la sierra de Coalcomán fue la zona más relevante, con 91 especies. Sin embargo, se identificó un vacío de conservación en la región central de la FVTM, donde las ANP son escasas. Se concluye que es prioritario establecer nuevas áreas protegidas o esquemas de conservación voluntaria en municipios de la subprovincia Neovolcánico tarasca, con el fin de consolidar un corredor biológico que conecte las zonas protegidas del oriente y occidente del estado.

Palabras clave: Conservación, Diversidad, Bosques templados

Abstract

Temperate forests in Michoacán face increasing pressure from land-use change, wildfires, and urbanization, threatening their high tree diversity. The aim of this study was to identify priority areas for the conservation of 208 tree species with temperate affinity, by analyzing their species richness, rarity, and strict rarity, and to assess their overlap with federal and

[44] Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Michoacán. Instituto Politécnico Nacional. Calle Justo Sierra Ote. 28, Colonia Centro, C.P. 59510 Jiquilpan de Juárez, Michoacán. morrisonrojo88@gmail.com, cmendezi@ipn.mx

[45] Laboratorio de Biodiversidad y Biogeografía de la Conservación (LaBBG), Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia, UNAM. Antigua carretera a Pátzcuaro 8701, ExHacienda de San José de la Huerta, Morelia, Michoacán, CP 58190. catomi@enesmorelia.unam.mx

state Protected Natural Areas (PNA). A presence-absence matrix was generated using a hexagonal grid of 64 km². Rarity was calculated based on the minimum spanning tree distance per species, while strict rarity considered only the species with the most restricted distributions. Results show that the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB) concentrates the highest richness (172 species), with Morelia and Uruapan identified as the highest priority regions, as protecting only 320 km² would safeguard 71 % of the species. In the Sierra Madre del Sur (SMS), the Coalcomán mountain range was the most relevant area, hosting 91 species. However, a significant conservation gap was identified in the central region of the TMVB, where protected areas are scarce. We conclude that it is essential to establish new protected areas or voluntary conservation schemes in municipalities of the Tarascan Neovolcanic subprovince, in order to consolidate a biological corridor connecting the already protected areas in the eastern and western portions of the state.

Keywords: Conservation, Diversity, Temperate forests

Introducción

A nivel mundial los bosques templados ocupan una superficie de 10,000,000 km², lo que representa alrededor del 25% del área forestal mundial (Galicia *et al*., 2018). En México, las zonas templadas se distribuyen principalmente en los macizos montañosos: Sierra Madre Occidental, Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur (SMS), Sierra Norte de Oaxaca y en el sur de Chiapas (Rzedowski, 2006), ocupando alrededor de 460,000 km² de superficie, que equivale al 23.4% del territorio nacional (González-Medrano, 2003).

Rzedowski (2006) afirma que en las zonas templadas se presentan los siguientes tipos de vegetación: bosque de *Quercus*, bosque de coníferas (bosque de *Pinus*, matorral de *Pinus*, bosque de *Abies*, bosque de *Pseudotsuga* y *Picea*, bosque de *Juniperus*, bosque de *Cupressus*) y bosque mesófilo de montaña. La extensión de cada tipo de vegetación en México es de: 5% el bosque de *Quercus* (95,000 km²), 14% el bosque de *Pinus* y *Pinus-Quercus* (242,495 km²), 1% otras coníferas y 0.87% (15,732 km²) el bosque mesófilo de montaña, siendo este el que presenta la mayor diversidad de especies por unidad de área.

Las zonas templadas en México, son relevantes en, al menos, cuatro rubros: social, económica, ambiental y biológica (Galicia, *et al*., 2018). Desde una perspectiva biogeográfica, las zonas templadas de México han constituido centros de diversificación para géneros como *Pinus* y *Quercus* (Nixon, 1993), los cuales presentan una elevada riqueza específica y endemismo (Valencia, 2004; Sánchez-González, 2008).

En Michoacán, las zonas templadas se localizan principalmente en la FVTM y en la SMS. Destaca la FVTM por ser la que presenta mayor extensión territorial de zonas templadas con 6,471.2 km² de bosque de coníferas y 4,118.5 km² de bosque de encino. La SMS tiene 4,640.2 km² de bosque de coníferas (IhI y Bautista, 2019). Los bosques de *Abies* con 115 km² presentan una distribución discontinua, y se localizan principalmente al oriente del estado en la reserva de la mariposa monarca, en la zona de Tancítaro y en la sierra de Coalcomán (García, 2001; Cornejo-Tenorio *et al*., 2003). Por su parte, el bosque mesófilo de montaña con 85 km², se distribuye en pequeños parches en cañadas húmedas tanto de la FVTM y SMS (Medina-García y Rodríguez-Jiménez, 1993; García, 2001; Cornejo-Tenorio *et al*., 2003; Santana *et al*., 2014; Valencia y Gual-Díaz, 2014).

Las comunidades vegetales templadas enfrentan diversas problemáticas como: el cambio de uso de suelo, la tala ilegal, incendios forestales, cambio climático y urbanización, que ponen en riesgo anualmente cientos de hectáreas de vegetación primaria (Bocco *et al*., 2001). Solamente entre los años 2004-2014 hubo una pérdida de 19,599 ha de bosques templados en Michoacán, siendo la región central la más afectada por la sustitución de bosques por huertas de aguacate (Loya-Carrillo y Mass, 2020).

De acuerdo con Ihl y Bautista (2019), la FVTM tiene un 55.2% de cobertura de vegetación natural, sin embargo, también presenta la mayor extensión territorial en uso agrícola con 14460.5 km², siendo la agricultura de temporal la de mayor extensión con 8,927.8 km²; mientras que, la SMS tiene el 85.5% de vegetación natural y un 14.5% de área cultivada, siendo la agricultura de temporal y riego las que predominan.

De acuerdo con Ihl y Bautista (2019), la FVTM tiene un 55.2% de cobertura de vegetación natural, sin embargo, también presenta la mayor extensión territorial en uso agrícola con 14460.5 km², siendo la agricultura de temporal la de mayor extensión con 8,927.8 km²; mientras que, la SMS tiene el 85.5% de vegetación natural y un 14.5% de área cultivada, siendo la agricultura de temporal y riego las que predominan.

Bajo este escenario de constantes presiones sobre la vegetación de regiones templadas, es necesario delimitar áreas prioritarias para la conservación, basadas en el análisis de la distribución de especies mediante sistemas de información geográfica utilizando multi criterios como riqueza, rareza, endemismo e irremplazabilidad (Torres-Miranda *et al*., 2011).

El objetivo de este trabajo fue identificar centros de riqueza, rareza y rareza estricta de la flora arbórea con afinidad templada en Michoacán, con el fin de identificar áreas prioritarias

para su conservación, además de traslapar estas áreas con las Áreas Naturales Protegidas (ANP) estatales y federales, para delimitar estrategias para la planeación sistemática de la conservación.

Materiales y métodos

Descripción del área

El estado de Michoacán de Ocampo se localiza en la región centro-occidente de México, entre las coordenadas 17° 55´ y -20° 24´de latitud norte y -100° 05´y -103° 44´de longitud oeste. Posee una extensión territorial de 58,599 km y presenta un pronunciado gradiente altitudinal que abarca desde el nivel del mar (o m) en su litoral del pacifico, hasta los 3,840 m.s.n.m. en la cima del volcán Pico de Tancítaro (Figura 1).

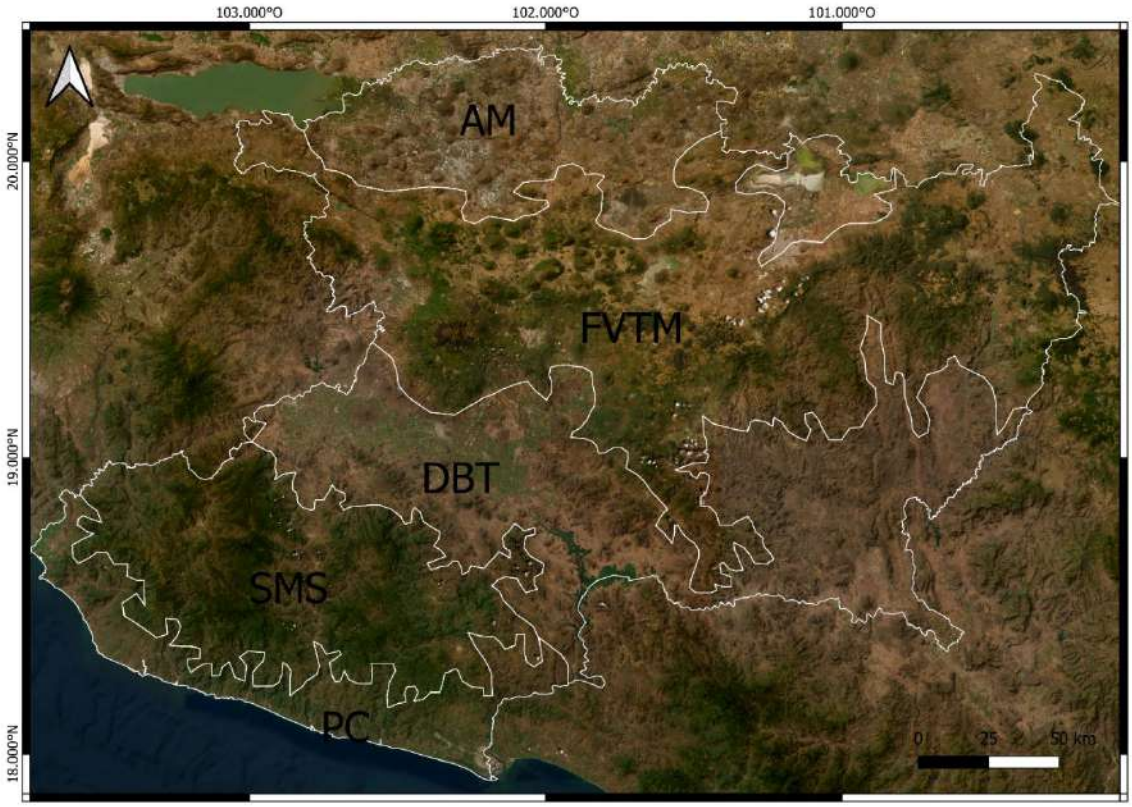


Figura 1. Regiones fisiográficas de Michoacán: AM: Altiplano; DBT: Depresión del Balsas-Tepalcatepec; FVTM: Faja Volcánica Transmexicana; PC: Planicie Costera; SMS: Sierra Madre del Sur.

Obtención de datos y depuración

Se identificaron 208 especies arbóreas con afinidad templada. Se obtuvieron los datos georreferenciados que corresponden a la distribución completa de cada una de las especies mediante la plataforma Global Biodiversity Information Facility (www.gbif.org acceso en 2025). Además, se consultaron los herbarios

CIMI (CIIDIR Jiquilpan) y EBUM (Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo), ya que sus colecciones no están en dicha plataforma. Siguiendo la metodología de Monterrubio-Rico *et al*. (2016), se depuraron de la base los datos repetidos, que estuvieran dentro de zonas urbanas o fuera de la distribución natural de las especies. Se elaboró una base de datos con cuatro columnas (familia, especies, latitud y longitud).

Se utilizaron criterios geográficos y ambientales para depurar los puntos de distribución de cada especie, mediante un script en el software R (Rstudio, 2025). En la depuración geográfica se aplicó un filtro estadístico considerando los percentiles 5 y 95 de las coordenadas de latitud y longitud, con esto se excluyó el 5% de los valores extremos de cada distribución. Para la depuración ambiental, se extrajeron los valores asociados a cada registro de distribución los valores de la elevación, la temperatura media anual y la precipitación anual (obtenidas de WorldClim 2.0, Fick y Hijmans, 2017). De esta manera, para cada especie se excluyeron aquellos puntos cuyos valores de elevación, temperatura media anual o precipitación anual era más grande a dos desviaciones estándar (que incluye aproximadamente el 95% de los datos).

Unidades de estudio y generación de matriz binaria de distribución

Se generó una gradilla de hexágonos de 5 x 5 minutos de grado (aproximadamente 64 km² por unidad) utilizando QGIS 3.40 (QGIS Development Team, 2024), con base en metodologías establecidas (Birch *et al*., 2007; Morales-Vásquez, 2021). Esta gradilla de 957 hexágonos cubre la totalidad del estado. Posteriormente, mediante superposición de capas de distribución de especies, se identificó que 550 hexágonos (57.5%) contenía al menos una especie arbórea de los bosques templados. A partir de estas unidades de análisis, se construyó una matriz (550 hexágonos x 208 especies) binaria de presencia (1) y ausencia (0).

Patrones de diversidad

*Riqueza***.** La riqueza específica, o diversidad alfa, corresponde al número total de especies presentes en una unidad espacial definida (Linder, 2001), en este estudio se cuantificó el número total de especies registradas en cada hexágono.

*Rareza***.** La rareza de especies se define como la combinación de una distribución restringida geográficamente y una baja abundancia local (Esparza-Olguín, 2004). Para cuantificar este parámetro, se obtuvo un árbol de tendido mínimo considerando el área de distribución completa de cada especie, ya que una especie puede ser rara en Michoacán, pero de amplia distribución fuera del estado. Los árboles de tendido mínimo, para cada especie, consisten en unir cada par de registros puntuales mediante líneas de mínima distancia sin formar ciclos.

Se calculó la distancia total, en kilómetros, de cada árbol de tendido mínimo, y a partir de esta distancia se obtuvo su inverso. El procedimiento anterior se realizó en QGIS. El número inverso de la distancia de cada especie sustituyó las presencias (1) de la matriz binaria de distribución. La rareza para cada hexágono consistió en la sumatoria de todos los inversos de distancias de sus especies presentes. Bajo este enfoque, la rareza de una especie aumenta conforme hay menor longitud en sus árboles de tendido mínimo.

Rareza estricta. El endemismo es un índice biogeográfico que evalúa la importancia de un área en función de sus especies endémicas, considerando tanto su número como el grado de restricción geográfica de cada una (Noguera-Urbano, 2017). Para su cuantificación, en este estudio, se calculó el rango de distribución de cada especie mediante la distancia de tendido mínimo. Se seleccionaron las especies con la distribución más restringida, definidas como aquellas que se ubicaron en los dos primeros cuartiles de las distancias calculadas de los árboles de tendido mínimo, por lo que este índice es considerado una rareza estricta. Se aplicó una transformación logarítmica, en base 10, a los valores de rango de las especies seleccionadas para maximizar su importancia. La rareza estricta para cada hexágono consistió en la sumatoria de los valores obtenidos para cada una de las especies seleccionadas.

La visualización de los tres índices de diversidad (riqueza, rareza y rareza estricta) se realizó en QGIS.

Identificación de áreas prioritarias

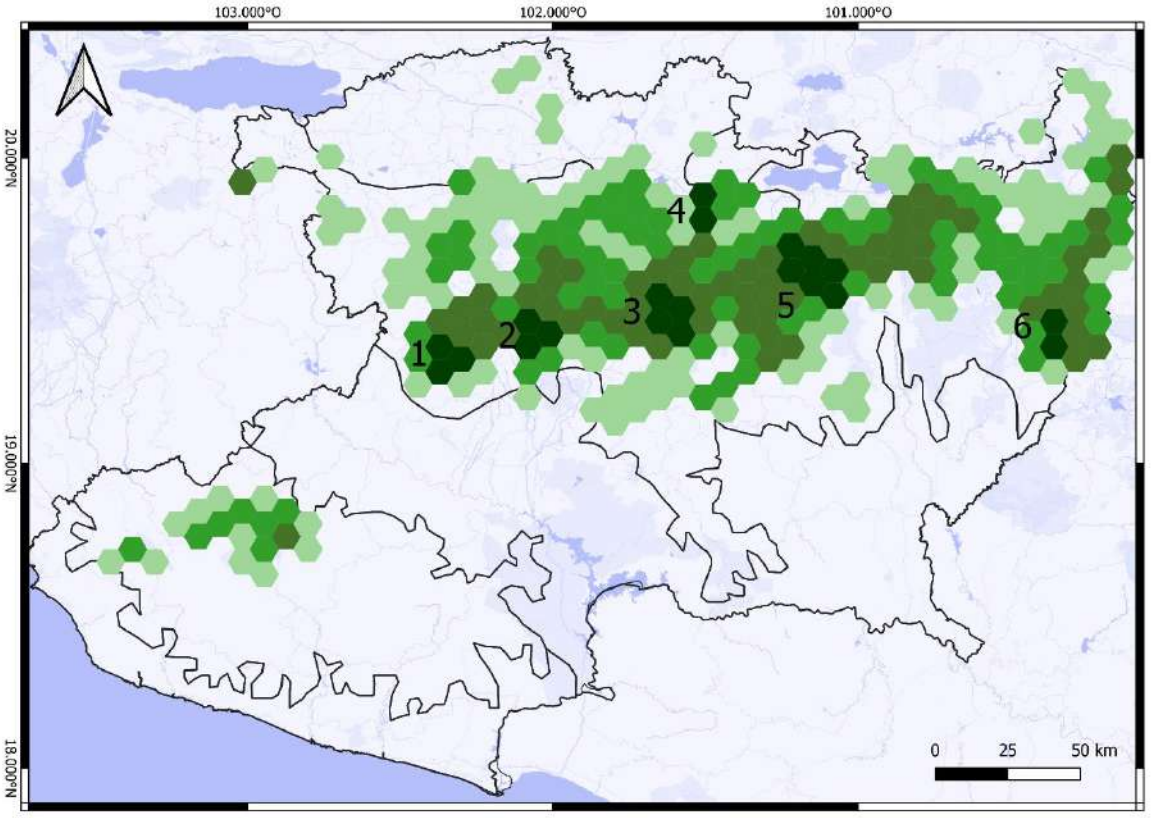
El primer paso para identificar las áreas prioritarias fue homogenizar las escalas de los tres índices de diversidad. Para ello, se aplicó una normalización basada en una regla de tres simple, asignando un valor máximo de 10 al hexágono con el valor más alto en cada criterio

individual. Este procedimiento permitió estandarizar la contribución de cada variable, evitando el sesgo hacia criterios con escalas de medición mayores. El segundo paso fue obtener un valor promedio por cada hexágono de los tres índices calculados: riqueza, rareza y rareza estricta. Las áreas prioritarias se identificaron como aquellos hexágonos que presentaron los promedios más elevados al combinar los tres criterios normalizados.

Resultados y discusión

El análisis de los patrones de riqueza de las 208 especies arbóreas con afinidad templada, revela una distribución heterogénea en la FVTM. En seis regiones se concentra la mayor riqueza de especies que albergan 172 especies (82.69% del total de especies templadas): (1) Tancítaro con 74 especies presentes; (2) Uruapan con 84 especies; (3) Pátzcuaro con 92 especies; (4) Huaniqueo con 74 especies; (5) Morelia con 133 especies; y (6) Zitácuaro con 83 especies.

Mientras que, en la SMS, los valores más elevados se registraron específicamente en la zona de la sierra de Coalcomán, particularmente en los limites municipales entre Coalcomán y Aguililla, así como en una porción del municipio de Aquila con un total de 85 especies



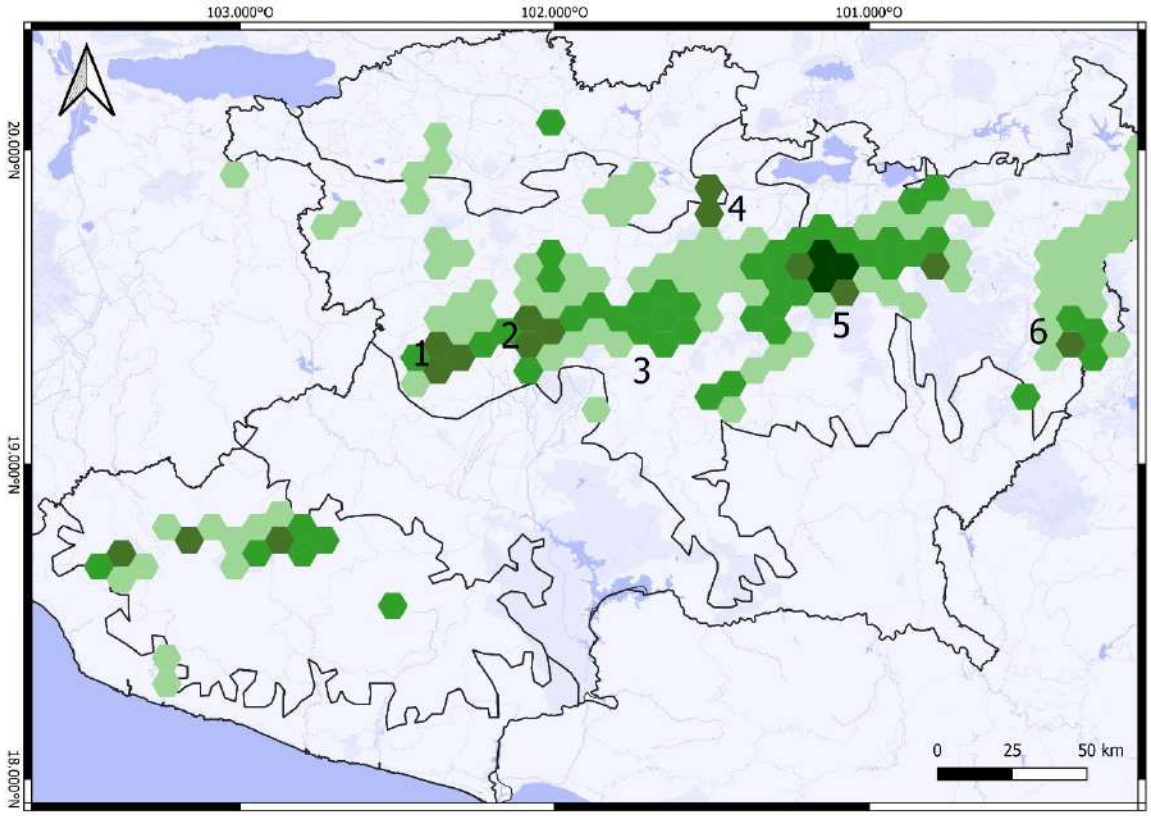
(Figura 2)

Figura 2: Regiones con alta riqueza de especies arbóreas templadas 1) Tancítaro, 2) Uruapan, 3) Pátzcuaro, 4) Huaniqueo, 5) Morelia y 6) Zitácuaro.

El análisis de rareza en la FVTM identificó cinco regiones relevantes, que coinciden con las regiones de alta riqueza exceptuando a la región de Pátzcuaro. Las regiones de alta rareza presentaron una notable reducción en su extensión geográfica en comparación con la delimitación por la riqueza. En el caso de Morelia, los valores más elevados de rareza se concentran en la mitad de las áreas en las que se concentra la mayor riqueza.

De manera paralela, en la SMS también se observo una reduccion en la extension espacial del patrón de rareza. Los valores más altos se concentraron en el en el municipio de Aguililla y sus limites con

Coalcoman, Chinicuila. Caso particular es el de Tumbiscatio, que si bien no presento una alta

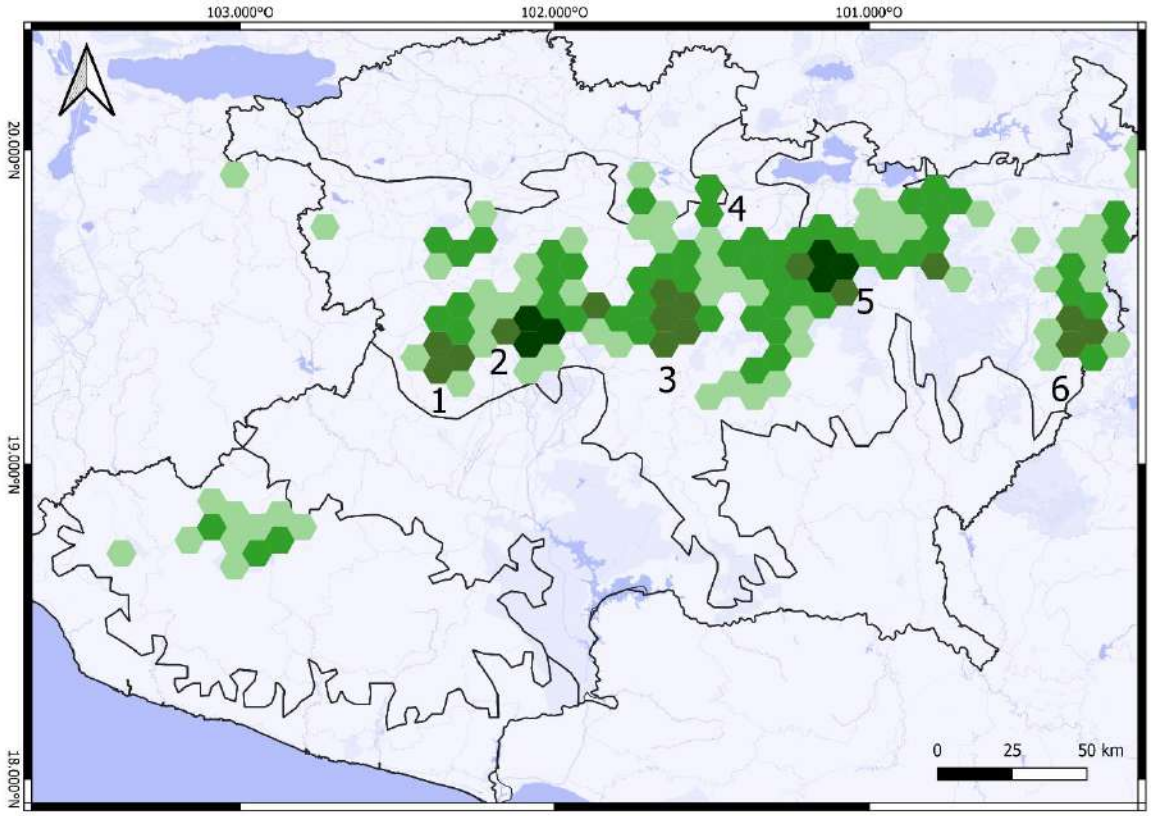


riqueza de especies, sí registra valores altos de rareza (Figura 3).

Figura 3: Regiones con alta rareza de especies arbóreas templadas 1) Tancítaro, 2) Uruapan, 3) Pátzcuaro, 4) Huaniqueo, 5) Morelia y 6) Zitácuaro

La rareza estricta en la FVTM revelo una distribución espacial particularmente concentrada en dos regiones principales: Uruapan y Morelia. Tancítaro y Zitácuaro presentaron valores de rareza estricta similares a los registrados para la rareza. En contraste, Pátzcuaro mostró valores de rareza estricta superiores a los de rareza. Huaniqueo disminuyó su importancia en cuanto a rareza estricta, lo que indica la presencia de especies con mayor amplitud en sus áreas de distribución.

Mientras que, en la SMS, los valores se mantuvieron homogéneos respecto a los demás patrones, siendo Coalcomán, Aguililla y Aquila donde se presentan los valores más altos de



rareza estricta (Figura 4).

Figura 4: Regiones con alta rareza estricta de especies arbóreas templadas 1) Tancítaro, 2) Uruapan, 3) Pátzcuaro, 4) Huaniqueo, 5) Morelia y 6) Zitácuaro.

La integración de los criterios de riqueza, rareza y rareza estricta permitió identificar las áreas prioritarias para la conservación de las 208 especies arbóreas templadas en Michoacán. En la FVTM, las regiones de Uruapan y Morelia se identificaron como las de máxima prioridad, ya que la protección de solo cinco hexágonos, equivalentes a 320 km², garantizaría la conservación de 148 especies, lo que representa el 71.15% del total. Por otra parte, Tancítaro, Pátzcuaro, Huaniqueo y Zitácuaro son zonas de prioridad secundaria, donde la protección de 12 hexágonos adicionales (768 km²) conservaría 137 especies, un 65.87% del total. De esta manera, Uruapan y Morelia son municipios estratégicos para la conservación de la flora arbórea templada de la FVTM.

En la SMS, las áreas prioritarias mostraron una notable congruencia espacial con los patrones de riqueza, rareza y rareza estricta. La región de mayor prioridad se localizó en los limites

municipales entre Coalcomán y Aguililla, así como una porción del municipio de Chinicuila. Estas zonas fueron identificadas como las más idóneas para la conservación, ya que en conjunto albergan 91 especies, lo que equivale al 43.75% del total (Figura 5).

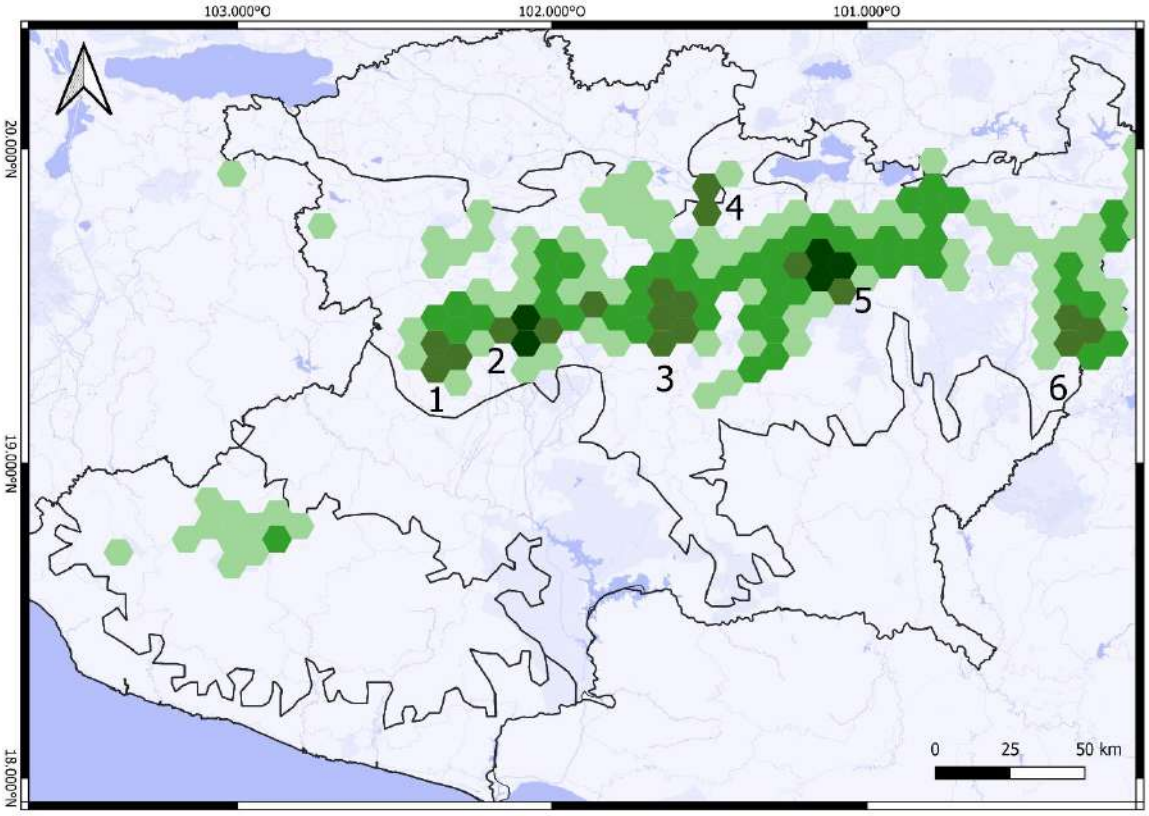


Figura 5: Áreas prioritarias para la conservación de las especies arbóreas templadas 1) Tancítaro, 2) Uruapan, 3) Pátzcuaro, 4) Huaniqueo, 5) Morelia y 6) Zitácuaro

El análisis de congruencia espacial entre las áreas prioritarias identificadas en este estudio y el sistema actual de áreas destinadas a la conservación en Michoacán (CONANP, 2025) revela un panorama heterogéneo, con coincidencias alentadoras, pero también con vacíos de conservación críticos. Se observa una congruencia significativa en dos regiones clave para la flora templada. En primer lugar, en Tancítaro de la FVTM y en la Sierra de Coalcomán en la SMS, coinciden con las Regiones Terrestres Prioritarias (RTP) y las Áreas Naturales Protegidas (ANP) federales de Tancítaro y de la sierra de Coalcomán. El área prioritaria de Zitácuaro, coincide al oriente con las ANP de la Reserva de la Mariposa Monarca y con la

RTP de Sierra Chincua.

Se identificó una superposición parcial en las regiones de alta diversidad; en Morelia coinciden las ANP estatales de la Cañada del Rio Chiquito y Pico Azul, mientras que el municipio de Uruapan lo hace con el ANP estatal de El Zapién y el parque urbano Lic. Salvador Bernal, aunque es importante señalar que este último carece de un plan de manejo, lo que podría limitar su efectividad para la conservación.

Sin embargo, al momento de empalmar los mapas, se evidencia una discordancia en el centro de la FVTM. Esta región, que presenta valores óptimos para la conservación, prácticamente no cuenta con áreas destinadas formalmente a este fin.A excepción de algunos sitios específicos en los municipios de Pátzcuaro (Estribito, Estribo Grande y Cerro de San Miguel), Tacámbaro (La Alberca, Cerro Hueco) y Paracho (Cerro Pelón), que cuentan con ANP estatales, el resto del área central presenta un vacío de conservación que pone en riesgo una porción significativa de la diversidad arbórea templada del estado.

Por lo tanto, se recomienda que los bosques de los municipios pertenecientes a la subprovincia Neovolcánico tarasca (Acuitzio, Erongarícuaro, Huiramba, Lagunillas, Nahuatzen, Paracho, Pátzcuaro, Quiroga, Salvador Escalante, Tacámbaro, Tingambato, Tzintzuntzan y Ziracuaretiro) sean considerados como una región prioritaria para la creación de nuevas áreas de conservación o para la implementación de esquemas de protección voluntaria. Esta acción consolidaría un corredor biológico en el centro de la FVTM, conectado las áreas ya protegidas del oriente y occidente del estado (Figura 6).

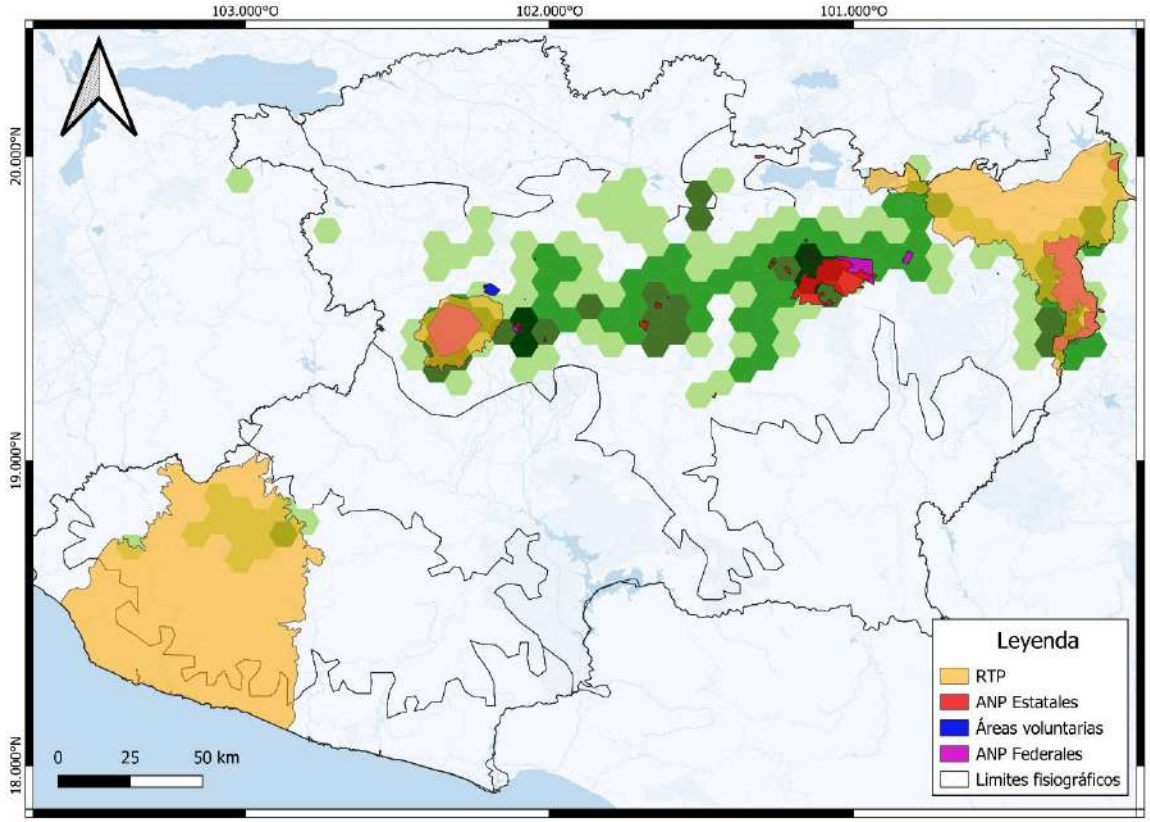


Figura 6. Comparativa entre los propuesto por la CONANP y las áreas prioritarias para la conservación

Conclusiones

La identificación de Morelia y Uruapan como áreas de máxima prioridad, junto con la sierra de Coalcomán en la SMS, permite orientar estratégicamente los esfuerzos de conservación hacia sitios con alta concentración de riqueza y rareza. Sin embargo, el vacío de conservación detectado en la región central de la FVTM subraya la urgencia de establecer nuevas ANP o esquemas de conservación voluntaria en la subprovincia Neovolcánico tarasca, lo que permitiría conformar un corredor biológico que articule las zonas protegidas del oriente y occidente del estado, garantizando la persistencia de la flora arbórea templada en Michoacán.

Literatura citada

Libros

García Ruíz, I. (2001). *Flora del Parque Nacional Pico de Tancítaro, Michoacán* (Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. H304). Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Michoacán.

González Medrano, F. (2003). *Las comunidades vegetales en México: propuesta para la unificación de la clasificación y nomenclatura de la vegetación de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.

Ihl, T., & Bautista, F. (2019). Estado actual de la cobertura vegetal y uso del suelo. En *La biodiversidad en Michoacán*. Estudio de Estado 2 (Vol. I, pp. 61-65). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).

Medina-García, C. y Rodríguez-Jiménez, L. S. (1993). Estudio florístico de la cuenca del Río Chiquito de Morelia, Michoacán, México. *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes, IV*.

Nixon, K. C. (1993). The genus Quercus in Mexico. En T. P. Ramammoorthy, R. Bye, A. Lot, & J. Fa (Eds.), *Biological diversity of Mexico: Origins and distribution* (pp. 447-458). Oxford University Press.

Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

Revistas

Birch, C. P. D., Oom, S. P., & Beecham, J. A. (2007). Rectangular and hexagonal grids used for observation, experiment and simulation in ecology. *Ecological Modelling*, 20(3–4), 347–359 https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.03.041

Bocco, G., Mendoza, M., & Masera, O. R. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán: una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. *Investigaciones Geográficas*, (44), 18-36. https://doi.org/10.14350/rig.59133

Cornejo-Tenorio, G., Casas, A., Farfán, B., Villaseñor, J. L., & Ibarra-Manríquez, G. (2003). Flora y vegetación de las zonas núcleo de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 73, 43-62. https://doi.org/10.17129/botsci.1678

Esparza-Olguín, L. G. (2004). ¿Qué sabemos de la rareza en especies vegetales? Un enfoque genético-

demográfico. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 75, 17-32. https://doi.org/10.17129/botsci.1691

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086

Galicia, L., Chávez-Vergara, B. M., Kolb, M., Jasso-Flores, R. I., Rodríguez-Bustos, L. A., Solís, L. E., Guerra de la Cruz, V., Pérez-Campuzano, E., & Villanueva, A. (2018). Perspectivas del enfoque socioecológico en la conservación, el aprovechamiento y pago de servicios ambientales de los bosques templados de México. *Madera y bosques*, 24(2), e2421443. https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421443

Linder, H. P. (2001). Plant diversity and endemism in sub-Saharan tropical Africa. *Journal of Biogeography*, 28(2), 169-182 https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2001.00527.x

Loya Carrillo, J. O., & Mass Caussel, J. F. (2020). Análisis del proceso de deforestación en el estado de Michoacán: de lo espacial a lo social. *Revista Cartográfica*, (101), 99-117. https://doi.org/10.35424/rcarto.i101.670

Monterrubio-Rico, T. C., Charre-Medellín, J. F., Pacheco-Figueroa, C., Arriaga-Weiss, S., Valdez-Leal, J. D., Cancino-Murillo, R., Escalona-Segura, G., Bonilla-Ruz, C., & Rubio-Rocha, Y. (2016). Distribución potencial histórica y contemporánea de la familia Psittacidae en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), 1103-1117. https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.004.

Noguera-Urbano, E. A. (2017). El endemismo: diferenciación del término, métodos y aplicaciones. *Acta Zoológica Mexicana*, 33(1), 89-107. https://doi.org/10.21829/azm.2017.3311016

Sánchez-González, A. (2008). Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y bosques*, 14(1), 107-120. https://doi.org/10.21829/myb.2008.1411222

Santana, G., Mendoza, M., Salinas, V., Pérez-Salicrup, D., Martínez, Y., & Aburto, I. (2014). Análisis preliminar de la diversidad y estructura arbórea-arbustiva del bosque mesófilo en el Sistema Volcánico Transversal de Michoacán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85(4), 1104-1116. https://doi.org/10.7550/rmb.41519

Torres-Miranda, A., Luna-Vega, I., & Oyama, K. (2011). Conservation biogeography of red oaks (Quercus, section Lobatae) in Mexico and Central America. *American Journal of Botany*, 98(2), 290-305. 10.3732/ajb.1000218

Valencia-A., S. (2004). Diversidad del género Quercus (Fagaceae) en México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 75, 33-53. 10.17129/botsci.1692

Valencia-A., S., & Gual-Díaz, M. (2014). La familia Fagaceae en el bosque mesófilo de montaña de México. *Botanical Sciences*, 92(2), 193-204 10.17129/botsci.45

Software

GBIF. (2025). Derived Dataset GBIF.org (enero 2025) Filtered Export of GBIF Occurrence Data. 10.15468/yxmivk

QGIS Development Team. (2024). QGIS Geographic Information System (Versión 3.40.0) [Computer software]. QGIS Association. https://www.qgis.org

R Core Team. (2025). R: A language and environment for statistical computing (Versión 4.4.0) [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Referencia electrónica

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (s.f.). Página oficial. Gobierno de México. https://www.gob.mx/conanp

Detección de ADN ambiental liberado por larvas de *Ambystoma mexicanum* en sistemas controlados

Dvorak Montiel Condado[46], Azucena del Carmen González Horta, Brenda González Hernández, Omar González Amezcua

Resumen

El ADN ambiental (eDNA) permite detectar organismos acuáticos sin capturarlos, pero la relación entre la cantidad de ADN recuperado y las variables biológicas depende del sistema y del método analítico. El objetivo fue evaluar la detección de ADN liberado por larvas de *Ambystoma mexicanum* bajo condiciones controladas y analizar su relación con la longitud total y las características físicoquímicas del agua. Se mantuvieron cinco acuarios durante 14 semanas; en las semanas 8, 10, 12 y 14 se registraron longitud, abundancia, temperatura, pH, sólidos disueltos totales y salinidad. Por acuario y punto de muestreo, se combinaron dos submuestras de 50 mL, se filtraron a través de membranas de 0.22 µm y el ADN se extrajo con DNeasy Blood & Tissue. La concentración de ADN bicatenario total se cuantificó mediante Qubit dsDNA HS, y la detección molecular se evaluó mediante PCR de punto final del gen del citocromo b (Cytb). La longitud media aumentó de 36.34 a 43.65 mm, mientras que el número de larvas disminuyó de 94 a 78. Tras omitir un valor atípico de 1.60 ng/µL, las concentraciones oscilaron entre 0.0196 a 0.0766 ng/µL. Las asociaciones con longitud y variables del agua mostraron un escaso poder explicativo ($R^2 \leq 0.20$). La PCR produjo el fragmento esperado de aproximadamente 450 pb en las muestras evaluadas y no en el control negativo. Los resultados demuestran la detectabilidad del eDNA en sistemas controlados, pero no permiten estimar la biomasa de manera cuantitativa. Para consolidar un indicador de abundancia, se requieren réplicas independientes y qPCR.

Palabras clave: ajolote mexicano; biomonitoreo; conservación; citocromo b; ADN ambiental.

Abstract

Environmental DNA (eDNA) enables the detection of aquatic organisms without capturing them; however, the relationship between the amount of recovered DNA and biological

[46] Facultad de Ciencias Biológicas, [2] Facultad de Ciencias Fisico Matemáticas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Av. Universidad s/n, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66455, México. Correo electrónico: *dvorak.montielcn@uanl.edu.mx, *dvorak.montielcn@uanl.edu.mx, azucena.gonzalezhr@uanl.edu.mx, brenda.gonzalezhn@uanl.edu.mx, omar.gonzalezmz@uanl.edu.mx

variables depends on both the system and the analytical method. The objective was to evaluate the detection of DNA released by *Ambystoma mexicanum* larvae under controlled conditions and analyze its relationship with total length and water physicochemical variables. Five aquaria were maintained for 14 weeks; during weeks 8, 10, 12, and 14, length, abundance, temperature, pH, total dissolved solids, and salinity were recorded. Per aquarium and sampling point, two 50-mL subsamples were pooled, filtered through 0.22-µm membranes, and DNA was extracted using the DNeasy Blood & Tissue kit. Total double-stranded DNA concentration was quantified using the Qubit dsDNA HS assay, and molecular detection was evaluated via endpoint PCR targeting the cytochrome b (*Cytb*) gene. Mean length increased from 36.34 to 43.65 mm, while the number of larvae decreased from 94 to

78. After omitting an outlier of 1.60 ng/µL, concentrations ranged from 0.0196 to 0.0766 ng/µL. Associations with larval length and water variables showed low explanatory power ($R^2 \leq 0.20$). PCR produced the expected approximately 450-bp fragment in the evaluated samples and no product in the negative control. These results demonstrate eDNA detectability in controlled systems, but do not allow for a quantitative estimation of biomass. To consolidate an abundance indicator, independent replication and qPCR are required.

Keywords: Mexican axolotl; biomonitoring; conservation; cytochrome b; environmental DNA.

Introducción

El ADN ambiental se define como material genético liberado al medio por células, mucosas, excretas y otros restos biológicos. Su aislamiento a partir de muestras de agua permite detectar especies de manera no invasiva y ha ampliado las capacidades de monitoreo de especies prioritarias o amenazadas (Ficetola et al., 2008; Thomsen & Willerslev, 2015). Sin embargo, la detección depende de la liberación, transporte, retención y degradación del ADN, así como del volumen procesado y la sensibilidad del método molecular (Barnes & Turner, 2016; Goldberg et al., 2016).

Ambystoma mexicanum es una salamandra neoténica endémica de Xochimilco, actualmente categorizada en peligro de extinción (P) bajo la NOM-059-SEMARNAT-2010. La transformación de su hábitat, la contaminación y las especies introducidas han provocado el declive de sus poblaciones silvestres, haciendo que los métodos no invasivos sean especialmente valiosos para su monitoreo. Antes de implementar un ensayo de eDNA en campo, es necesario evaluar, bajo condiciones controladas, la magnitud y variabilidad de la señal molecular liberada por los organismos.

La concentración de eDNA puede relacionarse con la abundancia o biomasa, sin embargo, esta asociación no es universal. El tamaño corporal, la etapa de desarrollo, la actividad, la densidad, la temperatura y el pH pueden alterar la liberación o persistencia del material genético (Takahara et al., 2012; Doi et al., 2017; Strickler et al., 2015). Además, la fluorometría mide el ADN bicatenario total y no discrimina el material genético de la especie objetivo, por lo que debe complementarse con un método de detección específico.

El objetivo de este estudio fue evaluar la detección de ADN ambiental liberado por larvas de *A. mexicanum* en acuarios, cuantificar la concentración total de ADN obtenida y analizar su relación con la longitud de las larvas y las variables fisicoquímicas del agua.

Materiales y métodos

Diseño experimental. Se establecieron cinco acuarios con larvas de *A. mexicanum* en agua desclorada, bajo condiciones de aireación de bajo flujo, alimentación diaria y limpieza controlada; cada acuario constituyó la unidad experimental. El diseño fue observacional, sin tratamientos comparativos, con un seguimiento de 14 semanas. Durante las semanas 8, 10, 12 y 14, se contabilizó el número de individuos y se determinó la longitud total (desde la sínfisis mandibular hasta la punta de la cola) en cinco larvas seleccionadas al azar por acuario. De forma simultánea, se midieron la temperatura, el pH, la salinidad y los sólidos disueltos totales (TDS) mediante un equipo multiparamétrico calibrado.

Muestreo y extracción. Las muestras se recolectaron antes de la limpieza y del recambio parcial de agua. Para cada acuario y punto de muestreo, se obtuvieron dos submuestras de 50 mL, las cuales se combinaron para formar una muestra compuesta de 100 mL. Como controles negativos, se incluyeron agua de preparación, un blanco de extracción y agua procedente de un acuario con *Lepisosteus oculatus*. Cada muestra compuesta se filtró a través de una membrana de 0.22 µm. Los filtros se conservaron en etanol frío a -20 °C. El ADN se extrajo con el kit DNeasy Blood & Tissue (Qiagen, Alemania) y los eluídos se almacenaron a -20 °C.

Cuantificación y detección molecular. El ADN bicatenario total de los extractos se cuantificó mediante fluorometría Qubit y el kit dsDNA High Sensitivity (Thermo Fisher Scientific, Estados Unidos). Se evaluó la detección molecular utilizando PCR de punto final con cebadores que se dirigen a un fragmento mitocondrial del gen citocromo b (Cytb) de aproximadamente 450 pb, empleando DreamTaq PCR Master Mix (2X) (Thermo Fisher Scientific, Estados Unidos).El programa térmico consistió en una desnaturalización inicial de 2 min a 95 °C; 35 ciclos de 94 °C por 30 s, 58.7 °C por 30 s y 72 °C por 30 s; y una extensión final de 5 min a 72 °C. Los productos de amplificación se visualizaron en geles de

agarosa al 2 %. Se utilizó ADN tisular de *A. mexicanum* como control positivo y agua del acuario de *L. oculatus* como control negativo.

Análisis. Las 20 combinaciones de acuario y punto de muestreo se analizaron inicialmente mediante estadística descriptiva. Posteriormente, se analizaron las relaciones entre la concentración total de ADN, la longitud promedio de las larvas y las variables fisicoquímicas; se evaluaron mediante modelos de regresión lineal simple, estableciendo un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Como las submuestras se unieron antes de hacer una única filtración, no hubo réplicas independientes para medir la variabilidad del proceso. Por lo tanto, los valores de R^2 se interpretaron solo como evidencia exploratoria y no como prueba de una relación predictiva clara.

Resultados y discusión

Las condiciones del agua se mantuvieron dentro de intervalos relativamente estrechos: pH de 8.21 a 8.96, salinidad de 0.23 a 0.44 g/L, TDS de 390 a 628 ppm y temperatura de 20.3 a 24.6 °C. El descenso de temperatura observado en la semana 14 fue común en todos los acuarios. En este estudio, las relaciones entre el ADN total y factores como la temperatura, el pH, los sólidos disueltos totales (TDS) o la salinidad mostraron un escaso poder explicativo (R^2 de 0.128 a 0.195), por lo que no se encontró un gradiente ambiental claro. Esta ausencia de una relación significativa no excluye efectos de dichas variables fuera del intervalo evaluado; la temperatura y el pH pueden alterar la persistencia del eDNA en microcosmos acuáticos (Strickler et al., 2015).

La longitud media no ponderada entre acuarios aumentó de 36.34 mm en la semana 8 a 43.65 mm en la semana 14, mientras que el número total de larvas disminuyó de 94 a 78 (Cuadro 1). El acuario 2 presentó, de manera simultánea, la mayor longitud media y la reducción más drástica en su abundancia. Este patrón es compatible con efectos de densidad y competencia interespecífica, sin embargo, el diseño experimental actual no permite aislar la contribución individual de dichos factores.

Cuadro 1. Resumen de abundancia, longitud y ADN bicatenario total recuperado por semana.

Semana	Larvas (n)	Longitud media, mm (intervalo entre acuarios)	ADN total, ng/µL (mediana; intervalo)
8	94	36.34 (26.30-48.70)	0.0522 (0.0216-0.0734)
10	89	38.48 (31.30-53.72)	0.0626 (0.0196-1.6000)

Semana	Larvas (n)	Longitud media, mm (intervalo entre acuarios)	ADN total, ng/µL (mediana; intervalo)
12	82	42.24 (32.54-56.56)	0.0644 (0.0240-0.0724)
14	78	43.65 (32.95-58.93)	0.0636 (0.0240-0.0766)

Fuente: Elaboración propia con datos del estudio.

Las concentraciones de ADN bicatenario total fueron bajas y relativamente uniformes, salvo por un valor de 1.60 ng/µL registrado en el acuario 2 durante la semana 10. Tras excluir analíticamente dicho valor, las concentraciones oscilaron entre 0.0196 y 0.0766 ng/µL. La relación exploratoria con la longitud mostró un escaso poder explicativo ($R^2 \approx 0.20$). Por tanto, los datos no sustentan que la cuantificación mediante Qubit funcione como un indicador directo de biomasa. Esto es coherente con la naturaleza del ensayo: Qubit mide todo el ADN bicatenario presente en el extracto, incluyendo el ADN microbiano y material genético no perteneciente a la especie objetivo. Las relaciones entre eDNA y biomasa requieren de un ensayo específico y una calibración bajo condiciones controladas, como se ha demostrado en otros organismos acuáticos (Takahara et al., 2012; Doi et al., 2017).

La PCR produjo amplicones del tamaño esperado (aproximadamente 450 pb) en las muestras examinadas de los acuarios 2 y 5, así como en el control positivo; por el contrario, el control negativo no mostró amplificación visible (Figura 1). Este resultado demuestra que el material genético liberado por las larvas fue viable para su aislamiento y amplificación en el sistema experimental. Sin embargo, la presencia de un fragmento del tamaño esperado no reemplaza la secuenciación ni un ensayo de qPCR específico. Por lo tanto, este hallazgo se entiende como una confirmación molecular de la detectabilidad del eDNA bajo las condiciones evaluadas, y no como una validación completa de la especificidad taxonómica.

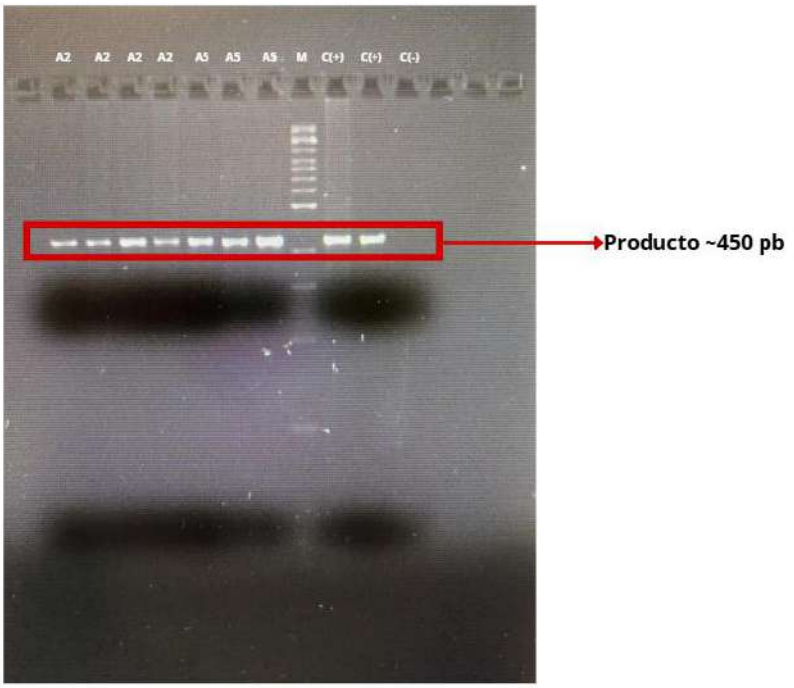


Figura 1. Amplificación del fragmento mitocondrial de citocromo b en extractos ambientales. A2 y A5: muestras de los acuarios 2 y 5; M: marcador de tamaño; C(+): control positivo; C(-): control negativo. La flecha indica el producto esperado de aproximadamente 450 pb.

Fuente: Elaboración propia con resultados del estudio.

El estudio demostró que es posible la obtención y amplificación de eDNA a partir de muestras de 100 mL de agua en acuarios con larvas de *A. mexicanum*. Su principal aportación es establecer una línea base experimental para la optimización de este método no invasivo. Las siguientes etapas deben incluir réplicas técnicas y biológicas, controles de inhibición, una curva estándar y pruebas de qPCR con cebadores y sonda específicos. También es necesario establecer los límites de detección y cuantificación.

Conclusiones

Se aisló exitosamente el ADN de larvas de *Ambystoma mexicanum* a partir de muestras de agua y se generó un amplicón mitocondrial del tamaño esperado mediante PCR de punto final. La concentración total de ADN bicatenario cuantificada con Qubit fue baja, presentó un valor atípico y mostró relaciones débiles con la longitud larvaria y las variables

fisicoquímicas. Por consiguiente, el estudio demuestra la detectabilidad del material genético en condiciones controladas, pero no valida la fluorometría como un estimador viable de biomasa. Para establecer este procedimiento como una herramienta de monitoreo cuantitativo, se necesita un ensayo específico de qPCR, réplicas independientes y la validación de la eficiencia de amplificación, los efectos de inhibición, y los límites de detección y cuantificación.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, a través del proyecto CBF2023-2024-3754, y se desarrolló en el Laboratorio de Ciencias Genómicas de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

Literatura citada

Artículos científicos

Barnes, M. A., & Turner, C. R. (2016). The ecology of environmental DNA and implications for conservation genetics. *Conservation Genetics*, *17*, 1-17. https://doi.org/10.1007/s10592-015-0775-4

Doi, H., Inui, R., Akamatsu, Y., Kanno, K., Yamanaka, H., Takahara, T., & Minamoto, T. (2017). Environmental DNA analysis for estimating the abundance and biomass of stream fish. *Freshwater Biology*, *62*(1), 30-39. https://doi.org/10.1111/fwb.12846

Ficetola, G. F., Miaud, C., Pompanon, F., & Taberlet, P. (2008). Species detection using environmental DNA from water samples. *Biology Letters*, *4*(4), 423-425. https://doi.org/10.1098/rsbl.2008.0118

Goldberg, C. S., Turner, C. R., Deiner, K., Klymus, K. E., Thomsen, P. F., Murphy, M. A., Spear, S. F., McKee, A., Oyler-McCance, S. J., Cornman, R. S., Laramie, M. B., Mahon, A. R., Lance, R. F., Pilliod, D. S., Strickler, K. M., Waits, L. P., Fremier, A. K., Takahara, T., Herder, J. E., & Taberlet, P. (2016). Critical considerations for the application of environmental DNA methods to detect aquatic species. *Methods in Ecology and Evolution*, *7*(11), 1299-1307. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12595

Strickler, K. M., Fremier, A. K., & Goldberg, C. S. (2015). Quantifying effects of UV-B, temperature, and pH on eDNA degradation in aquatic microcosms. *Biological Conservation*, *183*, 85-92. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.11.038

Takahara, T., Minamoto, T., Yamanaka, H., Doi, H., & Kawabata, Z. (2012). Estimation of fish biomass using environmental DNA. *PLoS ONE*, *7*(4), e35868. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035868

Thomsen, P. F., & Willerslev, E. (2015). Environmental DNA: An emerging tool in conservation for monitoring past and present biodiversity. *Biological Conservation, 183*, 4-18. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.11.019

Normativa y recursos electrónicos

IUCN SSC Amphibian Specialist Group. (2020). *Ambystoma mexicanum*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2020*: e.T1095A53947343. https://www.iucnredlist.org/species/1095/53947343

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/

Diversidad y uso del hábitat por aves en un sistema de labranza de conservación cero-cerco vivo

Saúl Ugalde-Lezama[47], Claudio Romero-Díaz[48], Luis Antonio Tarango-Arámbula[49], Eliseo Hernández-Hernández, Cristian Ismael Torres-González[50], Rosa María García-Núñez[51]

Resumen

Los sistemas agrícolas con Labranza de Conservación Cero-Cerco Vivo (LC0–CV) representan una alternativa para la conservación de aves. El objetivo de este estudio fue determinar el papel de estos sistemas en la diversidad y el uso del hábitat por comunidades avifaunísticas en el Altiplano Potosino-Zacatecano, México. De junio (2020) a mayo (2021) se evaluaron siete parcelas agrícolas mediante conteos en puntos de radio fijo y búsqueda intensiva. Se caracterizó la estructura de la vegetación y los atributos del hábitat mediante cuadros empotrados y líneas de Canfield. Se estimó la riqueza (Jackknife 1), diversidad (Shannon-Wiener), y similitud (Sorensen). Se desarrollaron pruebas de Kruskal-Wallis y modelos lineales generalizados con regresión de Poisson. Se registraron 52 especies distribuidos en cinco órdenes y 19 familias, destacando Passeriformes como el grupo más representativo (67 %). Se identificó una especie en peligro de extinción, dos amenazadas, cinco sujetas a protección especial y cuatro endémicas. La diversidad osciló entre H'=2.84 y 3.15, mientras que la similitud promedio entre parcelas fue del 31 %, evidenciando una alta heterogeneidad en la composición de especies. El uso del hábitat estuvo dominado por el vuelo, el suelo y el estrato herbáceo, mientras que los modelos estadísticos confirmaron que la estructura de la vegetación, los sustratos disponibles y los cercos vivos influyeron significativamente en la distribución de la avifauna. Se concluye que la implementación de

[47] Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos, Área de Recursos Naturales Renovables. Carretera Federal México-Texcoco Km 38.5, Universidad Autónoma Chapingo, C.P. 56230 El Cooperativo, México

[48] Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Fitotecnia, Doctorado en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible. Carretera Federal México-Texcoco Km 38.5, Universidad Autónoma Chapingo, C.P. 56230 El Cooperativo, México. biologoinders@gmail.com

[49] Colegio de Posgraduados Campus San Luis Potosí. Programa Nacional de Posgrados de Calidad. Innovación en Manejo de Recursos Naturales. Iturbide No. 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí. C. P. 78600. México

[50] Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, Ingeniería en Desarrollo Comunitario. Camino al Monte, s/n, esquina con Camino a Tlalmimilolpan, Loma de Guadalupe., Chicoloapan, Estado de México, C.P. 56380, México

[51] Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos, Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Carretera Federal México-Texcoco Km 38.5, Universidad Autónoma Chapingo, C.P. 56230 El Cooperativo, México

labranza de conservación y cercos vivos mejora la calidad del hábitat, favorece la diversidad de aves y fortalece la provisión de servicios ecosistémicos en los agroecosistemas.

Palabras clave: aves, agroecosistema, producción agrícola, riqueza, similitud.

Abstract

Zero Tillage-Living Fence (ZTF-LHF) agricultural systems represent an alternative for bird conservation. The objective of this study was to determine the role of these systems in the diversity and habitat use of avifaunal communities in the Potosino-Zacatecano Plateau, Mexico. From June 2020 to May 2021, seven agricultural plots were evaluated using fixed-radius point counts and intensive searches. Vegetation structure and habitat attributes were characterized using embedded squares and Canfield lines. Species richness (Jackknife 1), diversity (Shannon-Wiener), and similarity (Sorensen) were estimated. Kruskal-Wallis tests and generalized linear models with Poisson regression were developed. Fifty-two species distributed among five orders and 19 families were recorded, with Passeriformes being the most representative group (67%). One endangered species, two threatened species, five species under special protection, and four endemic species were identified. Diversity ranged from H'=2.84 to 3.15, while the average similarity between plots was 31%, indicating high heterogeneity in species composition. Habitat use was dominated by flight, ground, and herbaceous layer, while statistical models confirmed that vegetation structure, available substrates, and living fences significantly influenced bird distribution. It is concluded that the implementation of conservation tillage and living fences improves habitat quality, promotes bird diversity, and strengthens the provision of ecosystem services in agroecosystems.

Keywords: birds, agroecosystem, agricultural production, wealth, similarity.

Introducción

El número de especies de aves en la Tierra varía de acuerdo al concepto de especie que sea utilizado. Se reconocen alrededor de 8 200 según el concepto de especie biológica de Mayr (1942; 1946); según el concepto evolutivo, algunos ornitólogos reconocen hasta 18 000 (Haffer, 1997). El número de especies de dicho grupo taxonómico que se encuentran en el Neotrópico hacen de ésta la región con la mayor diversidad de aves de entre las seis existentes en el planeta (Perrins y Middleton, 1985), albergando alrededor de 3 715 (Stotz et al., 1996).

La pérdida y degradación del hábitat, el tráfico, el comercio ilegal, la cacería furtiva, la contaminación, la introducción de especies exóticas y la modificación de los regímenes naturales han provocado la alteración de la distribución y abundancia de muchas especies de

avifauna y, en ocasiones, su extinción. Estos procesos suelen interrumpir parcial o definitivamente sus actividades vitales (Vargas-Cárdenas et al., 2022), provocándoles estrés, cambios en el comportamiento y disminución o fracaso en eventos reproductivos, afectando al tamaño y viabilidad de sus poblaciones (Chen y Wang, 2024; Grames et al., 2023).

Los ecosistemas agrícolas albergan una enorme diversidad de aves. Algunos autores (Dinesh et al., 2022) aseveran que dicha diversidad implica la existencia de plagas, que consumen y diezman la producción de granos y semillas. Los sistemas convencionales de labranza se caracterizan por el alto número de operaciones de arado y rastra, al asociar equivocadamente la productividad del suelo con la intensidad de la preparación; son altamente costosos en términos ambientales y afectan, particularmente, a las propiedades físicas y los procesos ecológicos del componente edáfico. Para mitigar estos efectos y en contraposición a los sistemas tradicionales, aparecen técnicas como la Labranza de Conservación Cero (Aguilar-Jiménez et al., 2024), consistente en una considerable reducción del laboreo, en conjunción con el establecimiento de Cercos Vivos de Nopal (Opuntia spp.), que se basa en establecer cercos de la citada especie con el objeto de paliar el efecto de degradación del suelo previamente descrito. La conversión de terrenos hacia usos agropecuarios es una de las principales causas de la deforestación en todo el mundo, en Latinoamérica y concretamente en México.

La avifauna mexicana está integrada por 1 054 especies, distribuidas en 22 órdenes y 78 familias, de éstas, algunas son catalogadas como endémicas y otras se encuentran en peligro de extinción (Ortiz-Pulido, 2018). Su biodiversidad se encuentra asociada a la cobertura forestal, que está determinada por factores edáficos, geológicos, topográficos, climáticos y geográficos, abarcando en los 70’s aproximadamente 141 742 169 ha (SARH, 1994). No obstante, dicha cobertura vegetal experimenta una de las mayores deforestaciones a nivel mundial: a inicios de los 90’s se perdían anualmente 720 000 ha de bosques, selvas y vegetación semiárida. Existen, asimismo, 22 millones de hectáreas de zonas originalmente forestales que hoy están degradadas (SARH, 1994). En México, las superficies agrícolas abarcan 30 201 602 ha, equivalentes al 16% del territorio nacional (Navarro et al., 2000). Mucha de la producción agrícola proviene de zonas donde se acentúa la pérdida de suelo por efecto de la erosión, de especial relevancia en este país debido a su predisposición a la desertificación (Flores-Coronado et al., 2026). A la acción erosiva también contribuye el uso generalizado de prácticas inadecuadas de trabajo de la tierra, que ha provocado el deterioro de los recursos naturales a través de la sobreexplotación o la contaminación. Esta problemática es extensiva a todos los ecosistemas mexicanos, desde selvas altas hasta bosques áridos y semiáridos.

Los bosques de matorral xerófilo, ecosistemas muy frágiles por las especies endémicas que albergan, también han sufrido degradación ambiental, producto de métodos agrícolas

tradicionales que han seguido este patrón. Inicialmente, las superficies boscosas de matorral xerófilo ocupaban un total de 60 009 502 ha, parte de las cuales se distribuyen en el Altiplano Potosino–Zacatecano (Miranda y Hernández, 1963; Rzedowski, 1978), situado en el noroeste de México. Éstas han sido alteradas esencialmente por el sobrepastoreo y el establecimiento de cultivos agrícolas. En esta región se han establecido sistemas mixtos de producción basados en los ya mencionados sistemas de Labranza de Conservación Cero y Cercos Vivos de Nopal, cuya aplicación parece mitigar los efectos negativos que la intensificación agrícola tiene sobre el componente edáfico (Carranza-Patiño et al., 2024) y, potencialmente, sobre la biodiversidad, en particular sobre la avifauna. Sin embargo, no existen estudios que determinen qué aves pueden albergar los campos agrícolas objeto de la aplicación de las aludidas técnicas; los que hay están enfocados a determinar si una especie es una plaga o si puede afectar negativamente al cultivo. Se carece de investigaciones que acrediten su papel en el mantenimiento de comunidades avifaunísticas de relevancia para la conservación, inclusive cuando es bien sabido que dicho grupo taxonómico juega un rol trascendental en los flujos de energía dentro de y entre ecosistemas: ocupan muy diversos estratos en las cadenas alimentarias de cualquier zona, actúan sobre la propagación vegetativa como vectores de diseminación de semillas (Hernandez et al., 2023), etc.

Por lo tanto, de la conveniencia de implementar usos productivos compatibles con la conservación de las comunidades avifaunísticas se desprende la obligación de evaluar los cambios que éstos provocan sobre la diversidad (Lantschner y Rusch, 2007), por lo que el objetivo del presente estudio fue determinar el papel de los sistemas agrícolas en los que se aplica Labranza de Conservación Cero y Cerco Vivo (LC0–CV) en la diversidad y uso de hábitat por comunidades avifaunísticas específicas de este tipo de sistemas agrícolas.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en siete sistemas agrícolas con Labranza de Conservación Cero y Cerco Vivo, localizados en el municipio de Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, dentro del Altiplano Potosino-Zacatecano (22°45´06´´_22°42´11´´ N y 101°57´02´´_101°46´01´´W; 2215 msnm). Las unidades de estudio fueron delimitadas mediante un diseño de muestreo sistemático con puntos de observación distribuidos uniformemente para garantizar la independencia estadística de los datos.

Las comunidades de aves se evaluaron mediante conteos en puntos de radio fijo combinados con búsqueda intensiva (Ralph et al, 1996), durante cuatro monitoreos (junio (2020); mayo, junio, septiembre (2021)). En cada registro se documentó la especie, abundancia, sexo, edad y el uso del hábitat en los planos vertical y horizontal; la identificación taxonómica fue desarrollada mediante las guías de identificación propuestas por Peterson y Chalif (1989) y Howell y Webb (1995). Paralelamente, la vegetación se caracterizó mediante cuadrantes con

punto central y cuadros empotrados, registrando variables estructurales de los estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo (Cottam y Curtis, 1956; Oosting, 1956). Asimismo, las características del hábitat y las variables ambientales se evaluaron utilizando la línea de intercepción de Canfield (Canfield, 1941).

El análisis de la información incluyó estimaciones de abundancia, riqueza y diversidad de especies, estos últimos mediante el índice de Jackknife1 y Shannon-Wiener; de igual forma de determinó el índice de similitud mediante el estimador de Sorensen. Las diferencias entre unidades de estudio se evaluaron mediante ANOVA o Kruskal-Wallis, según el cumplimiento de los supuestos estadísticos (Akaike, 1969; Rosenberg et al., 1999). Finalmente, el uso del hábitat se analizó mediante índices de frecuencia de observación y modelos lineales generalizados con regresión de Poisson para determinar la relación entre la abundancia de aves, la estructura de la vegetación y el hábitat, dichos análisis fueron efectuados utilizando el software estadístico R-versión 2.12.1 (Agresti, 2002). Para todos los casos de modelación estadística se aplicó un intervalo de confianza del 95 %.

Resultados y discusión

En el conjunto de los Sistemas Agrícolas bajo estudio se registró un total de 52 especies de aves, distribuidas en cinco órdenes, 19 familias y 10 subfamilias. Los órdenes más representados fueron: Passeriformes con 35 especies (67%), Falconiformes con siete (13 %), Columbiformes con cinco (10 %), y Piciformes con cuatro (8%). Por su parte, las familias con mayor representación fueron Icteridae Emberizidae y Tyrannidae. De acuerdo a los criterios establecidos por la NOM-069-SEMARNAT se registró una especie en peligro de extinción (P), dos amenazadas (A), cinco sujetas a protección especial (Pr) y 44 no incluidas en ninguna categoría. De todas ellas, cuatro son endémicas (Cuadro 1).

La tendencia registrada de las familias con mayor presencia de aves, coincide con lo reportado por Lang et al. (2003) quienes señalaron a la familia Tyrannidae como la más abundante; por su parte Ibarra et al. (2001) evaluaron a la avifauna asociada a dos cacaotales en Tabasco, México, sus resultados concluyeron que las familias más representadas fueron Emberizidae y Tyrannidae, tal como se registró en el presente estudio.

Cuadro 1. Especies registradas en los Sistemas Agrícolas analizados.

N0	ESPECIE	CLAVE	ORDEN	FAMILIA	SUBFAMILIA	SEMARNAT (2010)	Ende
1	*Columba livia*	COLLIV	Columbiformes	Columbidae	-	-	-
2	*Columbina passerina*	COLPAS	Columbiformes	Columbidae	-	A	E
3	*Streptopelia chinensis*	STRCHI	Columbiformes	Columbidae	-	-	-
4	*Zenaida asiatica*	ZENASI	Columbiformes	Columbidae	-	-	-
5	*Zenaida macroura*	ZENMAC	Columbiformes	Columbidae	-	-	-
6	*Geococcyx californianus*	GEOCAL	Cuculiformes	Cuculidae	Neomorphinae	-	-
7	*Accipiter cooperii*	ACCCOO	Falconiformes	Accipitridinae	Accipitrinae	Pr	NE

8	*Buteo albonotatus*	BUTALB	Falconiformes	Accipitridinae	Accipitrinae	Pr	NE
9	*Buteo jamaicensis*	BUTJAM	Falconiformes	Accipitridinae	Accipitrinae	Pr	E
10	*Caracara cheriway*	CARCHE	Falconiformes	Falconidae	Caracarinae	-	-
11	*Cathartes aura*	CATAUR	Falconiformes	Cathartidae	-	-	-
12	*Elanus leucurus*	ELALEU	Falconiformes	Accipitridinae	Accipitrinae	-	-
13	*Falco peregrinus*	FALPER	Falconiformes	Falconidae	Falconinae	Pr	NE
14	*Aimophila botterii*	AIMBOT	Passeriformes	Emberizidae	-	-	-
15	*Aimophila cassini*	AIMCAS	Passeriformes	Emberizidae	-	-	-
16	*Amphispiza bilineata*	AMPBIL	Passeriformes	Emberizidae	-	A	NE
17	*Aphelocoma californica*	APHCAL	Passeriformes	Corvidae	-	-	-
18	*Auriparus flaviceps*	AURFLA	Passeriformes	Remizidae	-	-	-
19	*Camptostoma imberbe*	CAMIMB	Passeriformes	Tyrannidae	Elaeniinae	-	-
20	*Campylorhynchus brunneicapillus*	CAMBRU	Passeriformes	Troglodytidae	-	-	-
21	*Haemorhous mexicanus*	HAEMEX	Passeriformes	Fringillidae	Carduelinae	P	E
22	*Chondestes grammacus*	CHOGRA	Passeriformes	Emberizidae	-	-	-
23	*Corvus corax*	CORCOR	Passeriformes	Corvidae	-	-	-
24	*Corvus cryptoleucus*	CORCRY	Passeriformes	Corvidae	-	-	-
25	*Empidonax oberholseri*	EMPOBE	Passeriformes	Tyrannidae	Fluvicolinae	-	-
26	*Eremophila alpestris*	EREALP	Passeriformes	Alaudidae	-	-	-
27	*Hirundo rustica*	HIRRUS	Passeriformes	Hirundinidae	Hirundininae	-	-
28	*Icterus galbula*	ICTGAL	Passeriformes	Icteridae	-	-	-
29	*Lanius ludovicianus*	LANLUD	Passeriformes	Laniidae	-	-	-
30	*Mimus polyglottos*	MIMPOL	Passeriformes	Mimidae	-	-	-
31	*Molothrus ater*	MOLATE	Passeriformes	Icteridae	-	-	-
32	*Molothrus bonariensis*	MOLBON	Passeriformes	Icteridae	-	-	-
33	*Myiarchus cinerascens*	MYICIN	Passeriformes	Tyrannidae	Tyranninae	-	-
34	*Passer domesticus*	PASDOM	Passeriformes	Passeridae	-	-	-
35	*Passerina caerulea*	PASCAE	Passeriformes	Cardinalidae	-	-	-
36	*Pipilo fuscus*	PIPFUS	Passeriformes	Emberizidae	-	-	-
37	*Pyrocephalus rubinus*	PYRRUB	Passeriformes	Tyrannidae	Fluvicolinae	-	-
38	*Quiscalus mexicanus*	QUIMEX	Passeriformes	Icteridae	-	-	-
39	*Sayornis saya*	SAYSAY	Passeriformes	Tyrannidae	Fluvicolinae	-	-
40	*Spizella pallida*	SPIPAL	Passeriformes	Emberizidae	-	-	-
41	*Stelgidopteryx serripennis*	STESER	Passeriformes	Hirundinidae	Hirundininae	-	-
42	*Sturnella magna*	STUMAG	Passeriformes	Icteridae	-	-	-
43	*Sturnella neglecta*	STUNEG	Passeriformes	Icteridae	-	-	-
44	*Tachycineta thalassina*	TACTHA	Passeriformes	Hirundinidae	Hirundininae	-	-
45	*Toxostoma crissale*	TOXCRI	Passeriformes	Mimidae	-	-	-
46	*Toxostoma curvirostre*	TOXCUR	Passeriformes	Mimidae	-	-	-
47	*Tyrannus vociferans*	TYRVOC	Passeriformes	Tyrannidae	Tyranninae	-	-
48	*Xanthocephalus xanthocephalus*	XANXAN	Passeriformes	Icteridae	-	-	-
49	*Melanerpes aurifrons*	MELAUR	Piciformes	Picidae	Picinae	-	-
50	*Melanerpes formicivorus*	MELFOR	Piciformes	Picidae	Picinae	Pr	E
51	*Picoides scalaris*	PICSCA	Piciformes	Picidae	Picinae	-	-
52	*Picoides villosus*	PICVIL	Piciformes	Picidae	Picinae	-	-

Jacknife1 registró una riqueza de 13.96; 34.24; 47.28; 55.94; 62.6; 70.18; y 76.86 especies, respectivamente, para cada Sistema Agrícola analizado. Con el esfuerzo de muestreo aplicado se logró registrar el 19.3; 46.7; 23.26; 25; 30.3; 19.9; y 26 %, respectivamente, de la riqueza teóricamente presente en los sistemas agrícolas analizados (Figura 2).

La riqueza registrada contrasta con lo reportado por Bolwig et al. (2004), quienes analizaron dicho parámetro en tres tipos de ecosistemas agrícolas de Uganda: cultivo de elevada intensidad, de intensidad media y de baja intensidad; sus riquezas correspondientes fueron 79, 55 y 133 especies, respectivamente. Pese a que estas cifras, obtenidas difieren a los registrados en nuestra área de estudio, comparten el fenómeno de perturbación antrópica que supone la actividad agrícola, sugieren que nuestras parcelas tendrían una tendencia de acumulación de especies enmarcada en un área de intensidad media de cultivo, se puede afirmar que la intensidad de cultivo que se les aplica es inferior, por tratarse de parcelas de Labranza de Conservación Cero.

A pesar de que el número de especies registradas en comparación con las que potencialmente cabía esperar es aceptable, y en base a un estudio realizado por Ugalde et al. (2009), sería aconsejable que se ampliasen temporalmente los monitoreos y se incorporasen a éstos los meses de invierno, pues de este modo se podrían observar también especies de aves transeúntes durante su migración, lo que contribuiría de manera significativa al incremento de la riqueza; en ese contexto, el esfuerzo de muestreo realizado en la presente investigación parece influir sobre el número reducido de especies registradas, por lo tanto, es imperativo aumentar el mismo para obtener un registro más completo de las aves que potencialmente utilizan este tipo de sistemas agrícolas. De igual forma, Bojorges y López–Mata (2005) manifiestan que la riqueza de especies es susceptible de experimentar incrementos a través del tiempo, ya que especies accidentales o migratorias pueden presentarse en la zona de estudio por la cercanía que tiene con otras áreas e incrementar los parámetros de riqueza y diversidad avifaunística; estos dos autores publicaron un artículo en el que reportaron una riqueza que equivalió al 90 % de la esperada en su zona de estudio, debido a lo anteriormente expuesto. En relación a la posible disminución de especies residentes durante la época migratoria, estudios como el desarrollado por Enríquez–Lenis et al. (2007) en parcelas agrícolas aseveran que ésta es mínima. Además, Villaseñor y Santana (2002) afirman que, durante el periodo invernal, las aves migratorias pueden tener un uso menos especializado del hábitat, pudiendo utilizar hábitats perturbados especies típicas de otros ambientes, a diferencia de las aves residentes, que necesitan hábitats más específicos (Guo et al., 2023).

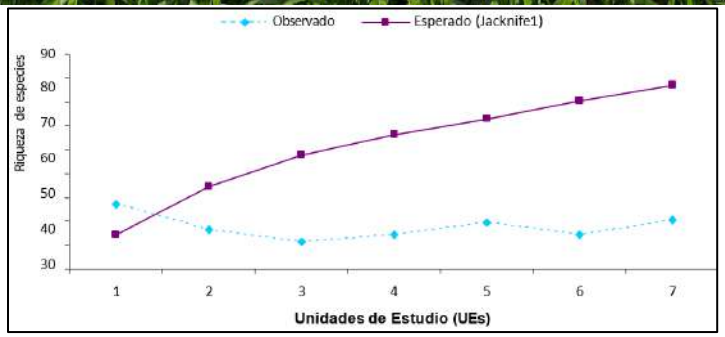


Figura 2. Curvas de acumulación de especies de aves observadas y estimadas por cada Sistema Agrícola evaluado.

Los resultados del moldeo Log–normal permitió resaltar que el valor obtenido de tablas (0.3518) con 3 grados de libertad es menor al valor calculado ((χ^2= 130.09), lo que evidencia que existen diferencias significativas entre las distribuciones de la abundancia observada y esperada a un nivel de significancia de α=0.05, por lo que faltó observar una importante proporción de los individuos que potencialmente se distribuyen en las UEs (Figura 3).

Por su parte, los resultados de la distribución de la abundancia en el presente estudio sugieren, que la comunidad avifaunística registrada sigue una distribución Log–normal, lo que indica que dicha comunidad está conformada por relativamente pocas especies con abundante número de individuos; especies más o menos abundantes y especies raras, así que no existe dominancia (monopolio) de ninguna especie sobre la utilización de recursos. Dichos resultados difieren de los obtenidos por Ugalde et al. (2009), quienes llevaron a cabo un estudio sobre la avifauna de dos zonas forestales en Zoquiapan (México): conservada vs. alterada; en dicho estudio encontraron que el área alterada presentó una distribución de la abundancia que se ajustó a una serie geométrica, mientras que la conservada se ajustó a una Log–normal. Así, el comportamiento de la comunidad avifaunística registrado en la presente investigación tiene una tendencia diferente, debido a que ésta fue realizada en zonas agrícolas de Labranza de Conservación Cero–Cerco Vivo y no en un rodal forestal conservado o perturbado.

La prueba de Bondad de Ajuste de χ^2 pone de manifiesto que faltó por registrar una importante proporción de los individuos que potencialmente cabía esperar en las UEs (P-value= 0.0280). De igual forma, Boulinier et al. (1998) hacen hincapié en que dichas variaciones pueden ser atribuibles a los factores previamente señalados (como la estacionalidad) aunados a la heterogeneidad del hábitat. Esta heterogeneidad proporciona una enorme diversidad de sustratos que, por sus diferentes fisionomías, potencialmente pueden influir en la detectabilidad de un mayor o menor número de individuos. Por lo tanto, son

factores que además de influir potencialmente sobre la riqueza observada podrían estar influyendo sobre las frecuencias registradas de individuos por especie; este autor cita otras causas, como la habilidad del observador o la composición de la comunidad avifaunística, como posibles focos de desviación de los datos registrados con respecto a los reales, pudiendo tener algún efecto tanto en la riqueza como en la abundancia observada.

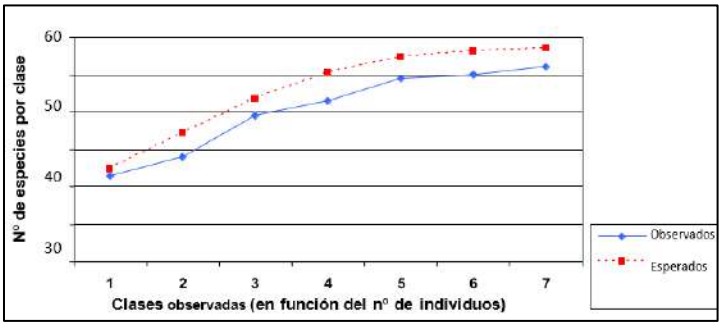


Figura 3. Abundancia de especies de aves observadas vs. esperadas mediante modelo de distribución Log - normal en las UEs estudiadas.

Kruskal–Wallis mostró diferencias significativas en la abundancia registrada para los diferentes sistemas agrícolas analizados (Figura 4). Los métodos de monitoreo utilizados fueron los mismos en todas las parcelas, pero hay varios factores relativos a dichos monitoreos, enunciados por Boulinier et al. (1998), que no fueron considerados y que pudieron influir sobre la detectabilidad de las aves. Teniendo en cuenta que el primer muestreo se ejecutó en el año 2020 y los tres restantes en el 2021, los datos tomados podrían diferir a causa de los cambios en la detectabilidad de las aves en función del tiempo; esta teoría es compartida por Gutzwiller (1991), que elaboró una caracterización de la riqueza de especies avifaunísticas de invierno en Texas, en la que controló estadísticamente las influencias anuales y estacionales sobre ésta. Otra explicación a estas diferencias subyace en la enorme variación entre parcelas en cuanto a su extensión. El número de especies aumenta a medida que se consideran áreas geográficas mayores (Whittaker, 1998), lo que explica en parte las marcadas diferencias en el número de especies observadas entre parcelas: la mayor riqueza se registró en la UE1 (27 especies), de 10 ha de extensión; la menor riqueza (11 especies) corresponde a la UE3, con una superficie de dos hectáreas. Esto concuerda con lo concluido por Williams (1943), que desarrolló un estudio empírico en el que implementó muestreos de diferentes características; sus resultados mostraron que el incremento de las especies era constante a medida que aumentaba el tamaño de las muestras, incluyendo más variedad ecológica ya sea por el clima, el suelo, la pendiente o algún otro factor. Es de suma importancia hablar de la influencia de la estructura de la vegetación sobre las características

de las comunidades de aves, y por ende señalarla como el factor que en mayor medida explica la variabilidad entre UEs a nivel de riqueza. A pesar de que todas las UEs comparten una estructura vegetal arbórea abierta con pies muy dispersos, su fisionomía difiere estructuralmente hablando, lo cual pudo originar las diferencias significativas entre ellas; esto constituye una congruencia con lo reportado por Lambert (1992) y MacArthur y MacArthur (1961), quienes añaden que la estructura de la vegetación es importante en la determinación de la estructura y composición de las comunidades de aves. Un estudio muy similar al que nos ocupa fue elaborado por Enríquez–Lenis et al. (2007) con objeto de analizar, entre otros, la abundancia de aves y su relación con la cobertura arbórea en un agropaisaje en Costa Rica; concluyendo que la diversidad vegetal explicó en gran parte la riqueza de aves y que las fincas heterogéneas con fragmentos boscosos tendrán efectos positivos sobre la avifauna. Por lo tanto, las diferencias entre UEs más abruptas a este respecto podrían atribuirse a la cobertura herbácea, lo que puede indicar que las diferencias en el número de especies entre parcelas se deben, en gran medida, a las especies que hacen uso de este estrato.

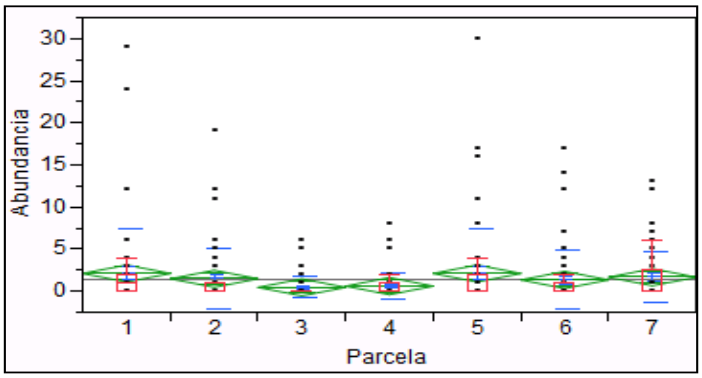


Figura 4. Medianas estadísticas de las abundancias de aves registradas en cada parcela analizada.

El estimador de Shannon–Wiener mostró un valor mínimo de H´= 2.84 (UE1) y un valor máximo de H´=3.15 (UE7), con valores menores para los diferentes sistemas agrícolas analizados (Figura 5). Estos valores son extraordinariamente elevados, especialmente si se tiene en cuenta que las parcelas objeto de estudio son ecosistemas agrícolas. Estos datos son contrastables con los obtenidos por Carrascal et al. (2002), que obtuvieron los índices de diversidad de un conjunto de parcelas que cubren un amplio espectro de formaciones vegetales que incluyen hábitats muy humanizados y formaciones naturales con diferente grado de degradación; los valores más bajos correspondieron a los campos de cultivo extensivo de cereal y los pastizales, situándose éstos entre H´=1 y H´=1.5. En la misma línea, Ibarra et al. (2001), obtuvieron un índice de Shannon para dos cacaotales de H´=1.40 y

H´=1.31, respectivamente. En las parcelas objeto del presente estudio, la presencia de cercos vivos ha contribuido significativamente al aumento de la diversidad, pues constituyen hábitats estrechos que se presentan como intermedios entre dos ambientes distintos, lo que, sumado a la presencia de árboles y arbustos atractivos para diferentes especies, incrementa la posibilidad de registro de especies (Simioni et al., 2022). El incremento de la diversidad que deriva de la presencia de cercos vivos está avalado por muchos estudios, como el realizado por Bennett (1998) con objeto de determinar el papel de los corredores y la conectividad en la conservación de la vida silvestre, enmarcado en el Programa de Conservación de Bosques de la UICN; en éste, el autor expone que sitios con setos, zanjas o arbolados lineales tienen más especies que áreas comparables de tierra de cultivo. Según Molano y Quiceno (2004), los cercos vivos funcionan como corredores de vegetación que permiten la reducción del efecto de la fragmentación en la capacidad de dispersión de ciertas especies al ofrecer espacios para percha, alimentación, refugio y anidación. Harvey et al. (2003) investigaron la contribución de los cercos vivos a la productividad e integridad ecológica de los agropaisajes en Centroamérica; en su publicación insisten en los ya mencionados efectos positivos de éstos y proponen líneas de trabajo que podrían potenciar su integración en las estrategias de conservación y producción sostenible, siendo éstas perfectamente aplicables a los cercos vivos del presente estudio: aumentar la abundancia de cercos vivos dentro de los paisajes, incrementar su diversidad florística y estructural y ubicar estratégicamente las cercas vivas para maximizar su contribución a la conectividad del paisaje.

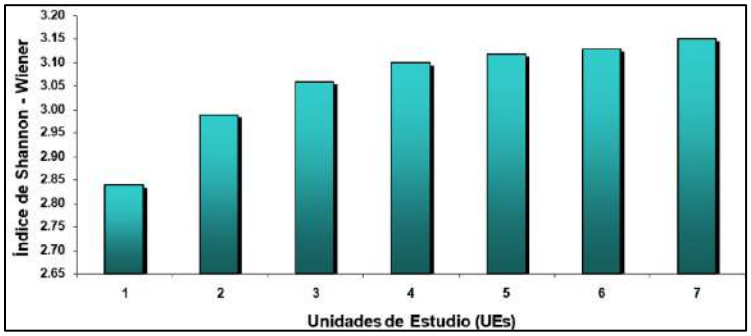


Figura 5. Diversidad registrada en cada sistema agrícola analizado.

Al no existir normalidad en los datos, la aplicación de la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis (P-value=0.4232) a los índices de Shannon–Wiener determinó la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas agrícolas analizados. Al igual que otros investigadores, esta tendencia puede ligarse de manera indirecta con el volumen de la vegetación y complejidad estructural (MacArthur y MacArthur, 1961; Vander Wall y MacMahon, 1984), siendo entonces el origen de las diferencias de abundancias las

disparidades en las conformaciones vegetales de las diferentes UEs. No obstante, otros estudios (Carrascal, 1987) sostienen que la abundancia y densidad de aves están reguladas por otros factores ajenos a las características de la estructura de la vegetación, actuando ésta tan sólo sobre el número de especies que pueden ocuparla. Carrascal (1987) afirma que la abundancia está determinada significativamente sólo por la altitud y densidad del arbolado (relaciones inversas); en nuestro caso, la densidad del arbolado es muy similar para todas las UEs, y éste está constituido por pocos pies dispersos, si bien es cierto que la diferencia de tamaño de las parcelas hace que, en las parcelas de superficie más reducida, las aves que se encuentran en sus márgenes (en su mayoría constituidas por formas de vegetación de tipo arbóreo o arbustivo) puedan ser observadas mediante la búsqueda intensiva, sucediendo lo contrario en las parcelas grandes.

La prueba de Kruskal–Wallis pone de manifiesto que no existen diferencias significativas entre parcelas en lo referido a dicho índice. El índice de Sorensen, por su parte, arroja datos que apuntan hacia la existencia de diferencias significativas entre UEs en términos de diversidad. Resultados similares obtuvieron Tejeda–Cruz y Gordon (2008), que desarrollaron un estudio en sistemas cafetaleros de Veracruz, resolviendo que la similitud entre la avifauna de las 22 parcelas estudiadas era baja, habiéndose basado en el criterio de Sánchez y López (1988) de considerar que dos comunidades faunísticas son similares si su índice de similitud es de al menos 66.6 % en base a la riqueza de especies. Dicha investigación se desarrolló sobre parcelas de índole mucho más diversa (bosque de montaña, café bajo monte, café de sombra, café simplificado y café bajo sol) que la de las siete parcelas que constituyen la zona de estudio de la presente investigación, sin embargo, la heterogeneidad en cuanto a especies es mayor en la presente que en el citado estudio; cabe resaltar que el criterio de similitud de Sánchez y López (1988) apoya la afirmación de que existen diferencias significativas entre nuestras siete UEs. El origen de esta aparente contradicción radica en que el índice de Shannon–Wiener no solamente considera los parámetros de diversidad y abundancia, sino que incorpora otros dos conceptos: uniformidad y equidad.

El índice de Sorensen mostró una similitud porcentual promedio entre los Sistemas Agrícolas analizados del 31 % con una disimilitud del 69 % entre cada uno de ellos. La similitud mayor se presentó entre las UEs 1 y 7, con un valor de 0.50, equivalente a un 50 %; por su parte la menor similitud se observó entre las UEs 2 y 4, con un valor de Sorensen de 0.15.

De total de individuos registrados el uso del hábitat estuvo determinado por la actividad en vuelo (27.95 %) y el registro de ejemplares en el suelo (24.58 %). Por su parte el uso de los sustratos vegetales estuvo lidereado por el componente herbáceo (15.15 %), seguido por el cerco vivo (7.07 %) y el pirul (6.40 %), el resto de sustratos mostraron valores menores (Cuadro 2).

La tendencia en los patrones de utilización registrados, difieren con lo expuesto por Emlen (1977) en su análisis de la estructura y dinámica de la avifauna en las Bahamas, cuya riqueza y diversidad descendían gradual y uniformemente desde el estrato inferior hasta el superior. Carrascal y Tellería (1985) llevaron a cabo un estudio multidimensional del uso del espacio en un grupo de aves forestales en el cual dividieron el plano vertical en cinco alturas, siendo las más explotadas las del estrato medio–inferiores; además, determinaron que las alturas no separan a las especies tanto como los sustratos vegetales. Por su parte la comunidad avifaunística analizada en el presente estudio está conformada por 52 especies, entre las que se han identificado patrones de utilización del plano vertical de la vegetación muy diversos que incluyen tanto a especies con un amplio espectro de utilización de estratos, como a otras especialistas que se ciernen a un único estrato; así pues, se puede afirmar que, a diferencia del estudio de Carrascal y Tellería (1985), en el que las especies no muestran una marcada selectividad al ocupar el rango de alturas, las especies que conforman el grupo estudiado sí se encuentran separadas por los patrones de utilización de los estratos.

Cuadro 2. Valor porcentual del uso del hábitat y los sustratos utilizados por las especies avifaunísticas registradas en los sistemas agrícolas evaluados.

ESPECIE	Vuelo	Suelo	Herb.	Mag.	Nop.	Mez.	Hui.	Cerc.	Yuc.	Pir.	Ind.
Columba livia	42.86	14.29	14.29	0	0	0	0	0	0	28.57	0
Columbina passerina	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Streptopelia chinensis	0	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0
Zenaida asiatica	36.11	19.44	19.44	2.78	2.78	2.78	2.78	5.56	2.78	5.56	0
Zenaida macroura	46.51	30.23	16.28	0	0	2.33	2.33	2.33	0	0	0
Geococcyx californianus	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Accipiter cooperii	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Buteo albonotatus	33.33	0	0	33.33	0	0	0	0	33.33	0	0
Buteo jamaicensis	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Caracara cheriway	40	0	20	0	0	0	20	0	20	0	0
Cathartes aura	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Elanus leucurus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Falco peregrinus	50	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0
Aimophila botterii	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0
Aimophila cassini	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Amphispiza bilineata	33.33	33.33	0	0	0	0	0	16.67	0	16.67	0
Aphelocoma californica	0	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0
Auriparus flaviceps	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
Camptostoma imberbe	0	0	0	0	0	33.33	33.33	0	0	33.33	0
Campylorhynchus brunneicapillus	0	22.22	0	11.11	0	22.22	0	22.22	0	22.22	0
Carpodacus mexicanus	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0
Chondestes grammacus	12.5	62.5	0	0	0	0	25	0	0	0	0
Corvus corax	69.23	19.23	0	3.85	0	3.85	0	0	3.85	0	0
Corvus cryptoleucus	5.26	21.05	31.58	5.26	0	5.26	5.26	21.05	0	5.26	0
Empidonax oberholseri	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0
Eremophila alpestris	0	40	40	0	0	0	0	0	0	20	0
Hirundo rustica	55.56	22.22	22.22	0	0	0	0	0	0	0	0
Icterus galbula	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Lanius ludovicianus	0	18.18	27.27	9.09	0	0	18.18	27.27	0	0	0
Mimus polyglottos	0	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0
Molothrus ater	0	0	50	0	0	0	0	50	0	0	0
Molothrus bonariensis	0	0	0	0	0	0	0	66.67	0	33.33	0
Myiarchus cinerascens	0	0	0	0	33.33	0	33.33	0	0	33.33	0
Passer domesticus	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Passerina caerulea	0	0	25	0	0	0	25	25	25	0	0

Pipilo fuscus	0	40	10	0	20	20	0	0	0	10	0
Pyrocephalus rubinus	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Quiscalus mexicanus	9.52	28.57	28.57	0	0	4.76	0	4.76	4.76	19.05	0
Sayornis saya	0	50	0	0	50	0	0	0	0	0	0
Spizella pallida	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0
Stelgidopteryx serripennis	40	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sturnella magna	0	0	50	0	0	0	0	50	0	0	0
Sturnella neglecta	33.33	66.67	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tachycineta thalassina	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Toxostoma crissale	0	37.5	37.5	0	0	12.5	0	0	0	12.5	0
Toxostoma curvirostre	0	33.33	0	0	33.33	0	33.33	0	0	0	0
Tyrannus vociferans	0	0	33.33	0	0	0	0	33.33	0	33.33	0
Xanthocephalus xanthocephalus	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Melanerpes aurifrons	0	20	20	40	0	20	0	0	0	0	0
Melanerpes formicivorus	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Picoides scalaris	0	0	0	0	0	50	0	0	50	0	0
Picoides villosus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

El análisis de regresión poisson mostro que dos, dos, tres, uno y dos variables, determinaron los estratos, sustratos, uso de los estratos-sustratos, sexo y edad de los ejemplares registrados en los sistemas agrícolas analizados (Cuadro 3).

Los modelos GLM de regresión Poisson confirmaron una elevada significancia del efecto de estrato en la distribución y abundancia de la avifauna registrada. En la misma línea, Cueto y López de Casenave (1999) analizaron mediante análisis de correlación simple la influencia de la estructura vertical de la vegetación sobre la riqueza de especies avifaunísticas, obteniendo que ambas variables están fuertemente correlacionadas. Según estos análisis, las variables con un grado de asociación significativo con el número de individuos son el estrato herbáceo y arbóreo, resultados que fortalecen lo presentado en esta investigación. Como se comenta en el apartado anterior, una característica extensiva a todas las UEs es la presencia de un estrato arbóreo muy disperso; tampoco el estrato arbustivo es abundante en la zona de estudio, encontrándose una presencia mucho mayor, generalmente, del estrato herbáceo. Las abundancias de las especies se relacionan con la disponibilidad de sus hábitats preferidos, de manera que la estructura de la vegetación es un factor determinante de los niveles poblacionales de las aves (Xu et al., 2022), lo cual contrasta con la abundancia de aves registradas en el estrato arbóreo, que en las UEs se presenta de forma muy dispersa y, por lo tanto, poco disponible. La alta significancia de este estrato en relación a la abundancia sugiere que deben concentrarse esfuerzos de gestión para conservar las especies que se encuentran en estas zonas agrícolas y potenciar la aparición de nuevas especies al mejorar la estructura

vegetal en los planos vertical-horizontal. Del mismo modo debería, por otra parte, actuarse sobre el estrato arbustivo; tal vez sea la baja disponibilidad de dicho estrato la causa de su poca significancia en relación a la abundancia de individuos. Ya se comentó la relevancia de los cercos vivos, integrados en el estrato arbustivo, a lo que contribuyen Carrascal y Tellería (1987) afirmando que las masas de arbustos actúan como islas forestales aglutinando, en reducidos espacios, una elevada cantidad de especies e individuos que en zonas agrícolas extensas desarboladas no encuentran el hábitat apropiado para su existencia durante el período reproductor.

Los resultados obtenidos tras la aplicación de los modelos GLM de regresión Poisson arrojaron unos resultados algo diferentes: según éstos, los tres sustratos que en mayor medida explican la variación de la relación abundancia–sustratos vegetales son: suelo, cerco vivo y sustrato herbáceo; se observa claramente una tendencia de las aves a ocupar las zonas inferiores de la estructura vegetal. Becerra y Grigera (2005) estudiaron la relación de una comunidad avifaunística de un bosque norpatagónico con la disponibilidad de sustratos de alimentación. En este documento, los autores ponen de relieve la importancia de los sustratos como fuente de alimento, aseverando que la variación en la disponibilidad y productividad de los sustratos influyen de manera crucial sobre la oferta de alimento a lo largo del año. Si bien el citado estudio se centra en describir las variaciones estacionales en el uso de los sustratos, la información que aporta en relación con el papel que desempeñan los sustratos como fuente de alimentación es de total aplicación en el presente estudio, explicando las diferencias en la utilización de los espacios analizados.

Cuadro 3. Variables que determinaron el uso de los sustratos-estratos de las aves registradas en los sistemas agrícolas analizados.

	Estimado	Error estándar	Valor de z	Pr(>|z|)	Significancia
		Estrato de localización			
Intercepto	3.041584	0.154539	19.682	< 2e-16	***
Estrato bajo	0.059316	0.011019	5.383	7.33E-08	***
Estrato superior	0.01498	0.00526	2.848	0.0044	**
		Sustrato de localización			
Suelo	1.005138	0.400328	2.511	0.01205	*
Cerco vivo	-0.065653	0.021738	-3.02	0.00253	**
Sustrato herbáceo	0.019102	0.006991	2.732	0.00629	**
		Actividad registrada en los estratos-sustratos			
Intercepto	3.02738	0.19201	15.767	< 2e-16	***
Reproducción	1.03963	0.14044	7.403	1.33E-13	***
Cortejo	-0.85504	0.2494	-3.428	0.000607	***
Percha	0.08689	0.01027	8.464	< 2e-16	***
		Sexo dominante en el uso de los estratos-sustratos			
Intercepto	2.86576	0.175	16.376	< 2e-16	***
Hembras	0.10231	0.02614	3.914	9.06E-05	***
		Estratos de edad con mayor registro de ejemplares			

Intercepto	3.109688	0.14301	21.745	< 2e-16	***
Adulto	0.017296	0.004362	3.965	7.33E-05	***
Juvenil	0.062126	0.01277	4.865	1.14E-06	***

Conclusión

Se logró determinar el papel que desempeñan los sistemas agrícolas con Labranza de Conservación Cero y Cerco Vivo (LC0–CV) en el mantenimiento de la diversidad y el uso del hábitat por comunidades avifaunísticas específicas. Los resultados obtenidos evidencian que la fisionomía y la complejidad estructural de la vegetación constituyen factores determinantes en la composición, diversidad, distribución e incidencia de las aves registradas en los sistemas agrícolas evaluados. Asimismo, la disponibilidad y heterogeneidad de los diferentes sustratos y estratos de la vegetación favorecieron el establecimiento de especies con distintos requerimientos ecológicos. En este contexto, la incorporación de cercos vivos y la implementación de prácticas de labranza de conservación contribuyen a incrementar la calidad del hábitat dentro de las matrices agrícolas, favoreciendo la permanencia de una mayor riqueza y diversidad de aves en comparación con sistemas agrícolas de menor complejidad estructural. En conjunto, los hallazgos destacan la importancia de promover prácticas agrícolas sustentables que integren componentes arbóreos y arbustivos, ya que no solo contribuyen a la conservación del suelo y al mantenimiento de la productividad agrícola, sino que también fortalecen la conservación de la biodiversidad y la provisión de servicios ecosistémicos asociados a las aves, por ejemplo el control biológico de plagas, la dispersión de semillas y el mantenimiento del equilibrio ecológico en los agroecosistemas.

Literatura citada

Agresti, A. (2002). Categorical Data Analysis. Wiley–Interscience. John Wiley & Sons, Inc., Publication. University of Florida. Gainesville, Florida. 708 p.

Aguilar-Jiménez, C. E., Galdamez, J., Martínez, F., Zapata-Hernández, I., Zamora-Natera, J. F., y Vázquez, H. (2024). Labranza de conservación y asociación maíz-calabaza en el control de erosión hídrica en Chiapas, México. Acta Agronómica, 73(2): 210-219.

Akaike, H. (1969). Fitting autoregressive models for prediction. Annals of the Institute of Statistical. Mathematics, 21: 243–247.

Becerra Serial, R., y Grigera, D. (2005). Dinámica estacional del ensamble de aves de un bosque norpatagónico de lenga (Nothofagus pumilio) y su relación con la disponibilidad de sustratos de alimentación. Centro Regional Universitario Bariloche, Universidad Nacional del Comahue. San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina.

Bennett, A.F. (1998). El papel de los corredores y la conectividad en la conservación de la vida silvestre. Enlanzando el paisaje. Programa de conservación de Bosques UICN. Conservando los Ecosistemas Boscosos, Serie nº1.

Bojorges, B.J.C., López-Mata, L., Tarango-Arámbula, L.A., Herrera-Haro, J.G. y Mendoza-Martínez, G. D. (2006). Combinación de métodos de muestreo para registrar la riqueza de especies de aves en ecosistemas tropicales. Universidad y Ciencia, 22(2): 111-118.

Bolwig, S., Mushabe, D., Nkuutu, D., Pomeroy, D., y Tushabe, H. (2004). Biodiversity in Uganda's Farming Systems in relation to Agricultural Intensification. Makerere University Institute of Environment and Natural Resources. Kampala. Uganda.

Boulinier, T., Nichols, J.D., Sauer, J.R., Hines, J.E., y Pollock, K.H. (1998). Estimating species richness: the importance of heterogeneity in species detectability. Ecology, 79(3): 1018-1028.

Canfield, R.H. (1941). Application of the line interception method in sampling range vegetation. Journal of Forestry, 34: 388-394.

Carranza-Patiño, M., Aragundi-Sabando, L., Macias-Barrera, K., Paredes-Sarabia, E., & Villegas-Ramírez, A. (2024). Conservación y manejo sostenible del suelo en la agricultura: Una revisión sistemática de prácticas tradicionales y modernas. Código científico revista de investigación, 5(E3): 1-28.

Carrascal, L.M. (1987). Relación entre avifauna y estructura de la vegetación en las repoblaciones de coníferas de Tenerife (Islas Canarias). Ardeola, 34(2): 193 – 224.

Carrascal, L.M., Palomino, D., y Lobo, J.M. (2002). Patrones de preferencias de hábitat y de distribución y abundancia invernal de aves en el centro de España. Análisis y predicción del efecto de factores ecológicos. Animal Biodiversity and Conservation, 25(1): 7-40.

Carrascal, L.M., y Tellería, J.L. (1985). Estudio multidimensional del uso del espacio en un grupo de aves insectívoras forestales durante el invierno. Ardeola, 32: 95-113.

Chen, J., & Wang, Y. (2024). Effects of habitat fragmentation on bird behavior and extinction mechanisms. International Journal of Molecular Zoology, 14.

Cottam, G., and Curtis, J.T. (1956). The use of distance measures in phytosociological sampling. ECOLOGY, 37: 451-460.

Cueto, V.R., y López de Casenave, J. (1999). Determinants of bird species richness: role of climate and vegetation structure at a regional scale. Journal of Biogeography, 26: 487-492.

Dinesh, G. K., Priyanka, B., Anokhe, A., Ramesh, P. T., Venkitachalam, R., Sri, K. K., ... & Soni, R. (2022). Ecosystem services and ecological role of birds in insect and pest control.

Plant Protection: From Chemicals to Biologicals. First Edit. De Gruyter, Berlin, Boston, Germany, 463-504 pp.

Emlen, J. (1977). Land bird communities of Grand Bahama Island: the structure and dynamics of an avifauna. University of Wisconsin, Department of Zoology, 118 p. 67–70.

Enríquez-Lenis, M.L., Sáenz, J.C., y Ibrahim, M. (2007). Riqueza, abundancia y diversidad de aves y su relación con la cobertura arbórea en un agropaisaje dominado por la ganadería en el trópico subhúmedo de Costa Rica. Agroforestería en las Américas, nº 45.

Flores-Coronado, A., Rivera Herrera, J. E., Ramírez-Pérez, A. H., & Santos-Gally, R. (2026). Silvopastoral vs. monoculture cattle systems in a humid Mexican Tropical Region: a greenhouse gas assessment. Agroforestry Systems, 100(7): 218.

Grames, E. M., Montgomery, G. A., Youngflesh, C., Tingley, M. W., & Elphick, C. S. (2023). The effect of insect food availability on songbird reproductive success and chick body condition: Evidence from a systematic review and meta-analysis. Ecology Letters, 26(4): 658-673.

Guo, F., Buler, J. J., Smolinsky, J. A., & Wilcove, D. S. (2023). Autumn stopover hotspots and multiscale habitat associations of migratory landbirds in the eastern United States. Proceedings of the National Academy of Sciences, 120(3): e2203511120.

Gutzwiller, K. J. (1991). Estimating winter species richness with unlimited-distance point counts. The Auk, 108(4): 853-862.

Haffer, H. (1997). Foreword on species concepts and species limits in ornithology. Handbook of the Birds of the World. Volume 4. Lynx Edicions.

Harvey, C. A., Villanueva, C., Villacis, J., Chacón, M., Muñoz, D., López, M., ... & Sinclair, F. L. (2003). Contribución de las cercas vivas a la productividad e integridad ecológica de los paisajes agrícolas en América Central. Agroforestería en las Américas, 10(39-40): 30-39.

Hernandez, J. O., Naeem, M., & Zaman, W. (2023). How does changing environment influence plant seed movements as populations of dispersal vectors decline?. Plants, 12(7): 1462.

Howell, S.N.G. and Webb, S. (1995). A guide to the birds of Mexico and Northern Central America. Oxford University Press. New York, U.S.A. 851 p.

Ibarra, A., Arriaga, S., Estrada, A. (2001). Avifauna asociada a dos cacaotales tradicionales en la región de la Chontalpa, Tabasco, México. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y Universidad Nacional Autónoma de México.

Lambert, F.R. (1992). The consequences of selective jogging for Bornean lowland forest birds. Philosophical Trans. Royal Soc. London Series B-Biol. Sci., 335: 443–457.

Lang, I., Gormley, L.H.L., Harvey, C.A., y Sinclair, F.L. (2003). Composición de la comunidad de aves en cercas vivas de Rio Frío, Costa Rica. Agroforestería en las Américas, 10(39-40): 86-92.

Lantschner, M.V. and Rusch, V. (2007). Impacto de diferentes disturbios antrópicos sobre las comunidades de aves de bosques y matorrales de Nothofagus antarctica en el NO Patagónico. Ecología Austral, 17: 99-112.

MacArthur, R.H., and MacArthur, J. W. (1961). On bird species diversity. ECOLOGY, 42: 594-598.

Mayr, E. (1942). Systematics and the Origin of Species. Columbia University Press. New York. ISBN 0-674-86250-3.

Mayr, E. (1946). History of North American bird fauna. Wilson Bulletin, 58: 3-41.

Miranda, F. y Hernández-X, E. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. Boletín de la Sociedad Botánica de México, 28: 29-179.

Molano, J.G., y Quiceno, M.P. (2004). El papel de las cercas vivas en un sistema agropecuario en el Pidemonte Llanero. Depósito de documentos de la FAO.

Navarro, B.A., Figueroa, S.B., Ordaz, Ch. V.M. y González, C.F.V. (2000). Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol. Terra, 18(1): 61-69.

Oosting, H.J. (1956). The study of plant communities. Freeman. San Francisco, USA. 185 p.

Ortiz-Pulido, R. (2018). ¿ Qué especies de aves están en riesgo en México?. Huitzil, 19(2): 237-272. https://doi.org/10.28947/hrmo.2018.19.2.348

Perrins, C. and Middleton, L.A. (1985). Birds: Owls, parrots and waders. Torstar editions, New York, USA. 160 p.

Peterson, R. T. y Chalif, E.L. (1989). Aves de México. Guía de campo. Editorial Diana. México, D. F. 473 p.

Ralph, C.J., Geupel, G.R., Pyle, P., Martín, T.E., DeSante, D.F. y Milá, B. (1996). Manual de métodos de campo para el monitoreo de aves terrestres. Department of Agriculture and Forest Service. USA. 46 p.

Rosenberg, K.V., Lowe, J.D. and Dhondt, A.A. (1999). Effects of forest fragmentation on breeding tanagers: A continental perspective. Conservation Biology, 13: 568-583.

Rzedowski, J. (1978). Vegetación de México. Editorial Limusa. México, Distrito Federal. 432 p.

Sánchez, O. y López, G. (1988). A theoretical analysis of some indices of similarity as applied to biogeography. Folia Entomológica Mexicana, 75: 119-145.

SARH (1994). Inventario Forestal Periódico. Memoria Nacional. Publicaciones de la Ed. de la Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Subsecretaria Forestal y de Fauna Silvestre. 81 p.

Simioni, G. F., Schmitt Filho, A. L., Joner, F., Farley, J., Fantini, A. C., & Moreira, A. P. (2022). Response of birds to high biodiversity silvopastoral systems: Integrating food production and biodiversity conservation through applied nucleation in southern Brazil. Agriculture, Ecosystems & Environment, 324: 107709.

Stotz, D. (1996). Neotropical birds: ecology and conservation. University of Chicago Press, Chicago. 478 p.

Tejeda–Cruz, C., y Gordon, C.E. (2008). Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz. Biodiversidad, manejo y conservación. Instituto de Ecología A.C., Instituto Nacional de Ecología.

Ugalde-Lezama, S., Valdez-Hernández, J.I., Ramírez-Valverde, G., Alcántara-Carbajal, J.L., y Velázquez-Mendoza, J. (2009). Distribución vertical de aves en un bosque templado con di-ferentes niveles de perturbación. Madera y Bosques, 15(1): 5-26.

Vander Wall, S. B., y MacMahon, J.A. (1984). Avian dístribution patterns along a Sonoran desert bajada. J. Arid Enviromnents, 7: 59-74.

Vargas-Cárdenas, F., Arroyo-Rodríguez, V., Morante-Filho, J. C., Schondube, J. E., Auliz-Ortiz, D. M., & Ceccon, E. (2022). Landscape forest loss decreases bird diversity with strong negative impacts on forest species in a mountain region. Perspectives in Ecology and Conservation, 20(4): 386-393.

Villaseñor, G., y Santana, E. (2002). El monitoreo de poblaciones: herramienta necesaria para la conservación de aves en México. In: Conservación de aves. Experiencias en México. Gómez D., H., y D. A. Oliveras (eds). Sociedad para el Estudio y Conservación de las Aves en México A.C. (CIPAMEX). México, D.F. pp: 224-262.

Whittaker, R.H. (1998). Island biogeography: ecology, evolution and conservation. Oxford University Press. New York.

Williams, C.B. (1943). Area and Lumber of species. Nature, Lond, 152: 264–267.

Xu, W., Yu, J., Huang, P., Zheng, D., Lin, Y., Huang, Z., ... & Fu, W. (2022). Relationship between vegetation habitats and bird communities in urban mountain parks. Animals, 12(18): 2470.

Monitoreo de Fauna Silvestre en el predio Ecoturístico "Ocho amigos", El Corrido, Tomatlán, Jalisco

Claudio Romero-Díaz[52], Saúl Ugalde-Lezama[53], Genaro Olmos Oropeza[54], Eliseo Hernández-Hernández, Cristian Ismael Torres-González[55], Rosa María García Núñez[56]

Resumen

Se realizó el monitoreo de fauna silvestre durante las épocas de primavera de los años 2021 y 2022, en el predio ecoturístico "Ocho Amigos", en el municipio de Tomatlán, Jalisco; con el fin de identificar taxonómicamente las especies del predio (aves, mamíferos, reptiles y anfibios), verificar su estatus de conservación de acuerdo con los criterios establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM 059-SEMARNAT-2010 y enlistar las especies endémicas. Se aplicó un diseño de muestreo sistemático donde fueron elegidos 10 unidades de estudio, distribuidos en cinco tipos de vegetación (dos por cada uno; cuerpos de agua, selva mediana, bosque de encino, áreas agrícolas y pastizal inducido). Para el seguimiento de ejemplares se aplicaron métodos de seguimiento de tipo directo e indirecto. Se registraron un total de 109 especies distribuidos en los grupos taxonómicos evaluados; se encontraron 15 especies en alguna categoría de riesgo según la NOM-059-SEMARNAT-2010; seis Sujetas a Protección Especial (Pr), cinco Amenazadas (A), tres en Peligro de Extinción (E) y una Probablemente Extinta en el Medio Silvestre (E). Se recomienda hacer recorridos dentro del predio para controlar la extracción irregular de este recurso, monitorear especies en riesgo con el fin de identificar factores que disminuyen sus poblaciones, realizar campañas de educación ambiental con los pobladores de la zona y establecer centros de reproducción de fauna silvestre, para el aprovechamiento cinegético y repoblamiento de las especies.

[52] Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Fitotecnia, Doctorado en Ciencias en Agricultura Multifuncional para el Desarrollo Sostenible. Carretera Federal México-Texcoco Km 38.5, Universidad Autónoma Chapingo, C.P. 56230 El Cooperativo, México

[53] Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos, Área de Recursos Naturales Renovables. Carretera Federal México-Texcoco Km 38.5, Universidad Autónoma Chapingo, C.P. 56230 El Cooperativo, México. biologo_ugalde@hotmail.com

[54] Colegio de Posgraduados Campus San Luis Potosí. Programa Nacional de Posgrados de Calidad. Innovación en Manejo de Recursos Naturales. Iturbide No. 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí. C. P. 78600. México

[55] Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, Ingeniería en Desarrollo Comunitario. Camino al Monte, s/n, esquina con Camino a Tlalmimilolpan, Loma de Guadalupe., Chicoloapan, Estado de México, C.P. 56380, México

[56] Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos, Maestría en Ciencias en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Carretera Federal México-Texcoco Km 38.5, Universidad Autónoma Chapingo, C.P. 56230 El Cooperativo, México

Palabras clave: monitoreo, fauna silvestre, aprovechamiento cinegético, conservación, ecoturismo.

Abstract

Wildlife monitoring was conducted during the spring seasons of 2021 and 2022 at the "Ocho Amigos" ecotourism property in the municipality of Tomatlán, Jalisco. The objective was to taxonomically identify the species present on the property (birds, mammals, reptiles, and amphibians), verify their conservation status according to the criteria established by the Mexican Official Standard NOM 059-SEMARNAT-2010, and list the endemic species. A systematic sampling design was applied, selecting 10 study units distributed across five vegetation types (two per type: bodies of water, medium-height forest, oak forest, agricultural areas, and induced pasture). Direct and indirect tracking methods were used to monitor specimens. A total of 109 species were recorded, distributed among the evaluated taxonomic groups. Fifteen species were found to be in some risk category according to NOM-059-SEMARNAT-2010; six Subject to Special Protection (Pr), five Threatened (A), three Endangered (E), and one Probably Extinct in the Wild (E). It is recommended to conduct patrols within the property to control the illegal extraction of this resource, monitor at-risk species to identify factors that decrease their populations, carry out environmental education campaigns with the local population, and establish wildlife breeding centers for hunting and species repopulation.

Keywords: monitoring, wildlife, hunting, conservation, ecotourism.

Introducción

Desde la llegada de los españoles, a mediados del siglo IV, éstos se maravillaron de la abundancia de especies de animales que existían a lo largo del territorio (Halffter, 2017); debido a su variada topografía y su situación en la unión de la zona neártica y neotropical, México está dotado de una fauna rica y variada, donde han evolucionado y habitado múltiples especies de animales y plantas, lo que propicia que nuestro país se ubique entre los de mayor diversidad del mundo (Péreza et al., 2019). La fauna silvestre se aprovecha con fines alimenticios, ornamentales, vestimenta, mascotas, medicinales y culturales, recientemente se añaden otros usos como es el de recreación, investigación, conservación y docencia (Nóbrega Alves, 2012). Debido a que se han aprovechado de forma irracional y a que se destruyen los ecosistemas naturales con fines productivos, las poblaciones silvestres están desapareciendo; actualmente son pocos los lugares menos alterados que aún conservan la fauna original, de aquí surge la necesidad de proteger dichos remanentes garantizando que las futuras generaciones puedan tener acceso a los beneficios que brindan las especies de fauna silvestre (Álvarez-Gallardo et al., 2024). Las especies animales han evolucionado de acuerdo a los cambios de los ecosistemas, para adaptarse a los nuevos hábitats asegurando su

supervivencia, de esta forma se ha creado una dinámica evolutiva que funciona a la par, formando una dependencia directa de los animales con el medio natural donde habitan, se dan múltiples relaciones dentro de los ecosistemas que llegan a formar una unidad, donde cada especie desarrolla un papel fundamental y la ausencia de una de ellas representa una pérdida irrecuperable (Roy et al., 2023; Chen y Wang, 2024). El predio "Ocho Amigos" se ha fundado como un proyecto ecoturístico, el cual está en etapa inicial, la zona donde se ubica es rica en biodiversidad, es aquí donde surge la inquietud de los administradores por monitorear la fauna silvestre presente, con fines de ubicar el número de especies y la situación de riesgo en que se encuentren. Por lo anterior el objetivo de este estudio fue enlistar las especies de aves, mamíferos, reptiles y anfibios presentes en el predio ecoturístico Ocho Amigos y documentar el estado de conservación para dichos grupos taxonómicos.

Materiales y métodos

El área de estudio tuvo una superficie de 562 ha, en el predio ecoturístico "Ocho Amigos", ubicado al noreste del municipio de Tomatlán, en el estado de Jalisco (20°03´48" N y 105°02´31" W; 400 msnm). Para la localización del sitio se desarrollaron recorridos guiados por informantes clave. Para la colecta de datos se estableció un diseño de muestreo sistemático, en dicho diseño fueron seleccionados 10 unidades de estudio, distribuidos en cinco tipos de vegetación (dos por cada uno; cuerpos de agua, selva mediana, bosque de encino, áreas agrícolas y pastizal inducido). La toma de variables se desarrolló en dos periodos de primavera (2021-2022), destinando un intervalo de cinco días para cada periodo. El registro de ejemplares se desarrolló a partir de un seguimiento combinado de métodos directos e indirectos (Hoefer et al., 2023; Tan et al., 2023; Sánchez-Brenes y Monge Meza, 2024; Turot et al., 2025). Las actividades fueron apoyadas por personal del predio mediante la autorización del administrador, el trabajo diario se llevó a cabo de la siguiente manera: captura de aves con redes de niebla en un horario de 6:30 a 12 h. Recorrido de identificación indirecta de anfibios y reptiles utilizando gancho herpetológico, cámara digital, binoculares y guías de campo; dicho recorrido se efectuó de 12:00 a 18:00 h; colocación de trampas de agarre para pequeños roedores y recorridos nocturnos con linternas para el registro de mamíferos mayores y aves nocturnas. La identificación de los ejemplares se realizó a partir de las guias taxonómicas propuestas por Peterson y Chalif (2008) para aves; Boitani y Bartoli (1985) y Aranda (1981) para mamíferos; y Casas y Clarence (1979) para anfibios y reptiles. Adicionalmente se utilizó el criterio propuesto por la NOM-059-SEMARNAT-2010 para el registro de especies bajo alguna categoría de conservación.

Resultados y discusión

Se registraron un total de 109 especies, distribuidos en los cuatro grupos de interés (aves, mamíferos, reptiles y anfibios; Cuadro 1, 2, 3), clasificados en 48 familias y 26 órdenes (Cuadro 4, 5, 6).

Cuadro 1. Aves registradas en el predio Ocho Amigos durante el periodo primavera (2021-2022).

N°	Nombre científico	Nombre común	Categoría	2021	2022	Total
1	*Tachybaptus dominicus*	Zambullidor menor	Pr	5	4	9
2	*Saltator coerulescens*	Saltador grisáceo		-	1	1
3	*Egretta thula*	Garza dedos dorados		3	2	5
4	*Casmerodius albus*	Garzón blanco		1	1	2
5	*Trigrisoma mexicanum*	Garza tigre mexicana	Pr	1	1	2
6	*Tigrisoma lineatum*	Garza tigre rojiza		1	1	2
7	*Egretta caerulea*	Garza azul		-	1	1
8	*Bubulcos ibis*	Garza ganadera		-	5	5
9	*Dendrocygna autumnalis*	Pato pijije aliblanco		4	-	4
10	*Dendrocygna bicolor*	Pato pijije alioscuro		-	2	2
11	*Coragyps atratus*	Zopilote carroñero		7	2	9
12	*Cathartes aura*	Aura común		2	1	3
13	*Pandion haliaetus*	Águila pescadora		1	-	1
14	*Circus cyaneus*	Aguililla rastrera		-	1	1
15	*Accipiter Striatus*	Gavilán pechirrufo menor		-	1	1
16	*Accipiter bicolor*	Gavilán pechigrís	A	-	1	1
17	*Harpyhaliaetus solitarius*	Águila solitaria	P	1	1	2

18	*Herpetotheres cachinnans*	Halcón guaco		-	1	1
19	*Ortalis Policefala*	Chachalaca pacifica		2	1	3
20	*Fúlica americana*	Gallareta americana		-	1	1
21	*Charadrius semipalmatus*	Chorlito semipalmeado		-	1	1
22	*Charadrius montanus*	Chorlito llanero	A	-	1	1
23	*Charadrius vociferus*	Chorlito tildío		-	2	2
24	*Himantopus mexicanus*	Avoceta piquirrecta		3	3	6
25	*Calidris mauri*	Playerito occidental		-	1	1
26	*Actitis macularía*	Playerito alzacolita		2	-	2
27	*Limosa haemastica*	Limosa ornamentada		5	-	5
28	*Numenius tahitiensis*	Zarapito del pacifico		-	1	1
29	*Gallinago gallinago*	Agachona común		-	2	2
30	*Heteroscelus incanus*	Playero sencillo		1	-	1
31	*Zenaida macroura*	Paloma huilota		-	1	1
32	*Columba fasciata*	Paloma collareja		-	2	2
33	*Leptotila verreauxi*	Paloma perdiz común		1	2	3
34	*Zenaida asiatica*	Paloma aliblanca		-	2	2
35	*Columbina talpacoti*	Tortolita rojiza		8	2	10
36	*Cynanthus sordidus*	Colibrí sórdido		-	1	1
37	*Ara militaris*	Guacamaya verde	P	4	2	6
38	*Amazona finschi*	Loro occidental	P	-	2	2
39	*Aratinga canicularis*	Perico frentinaranja	Pr	5	5	10
40	*Piaya cayana*	Cuclillo marrón		-	1	1

41	*Crotophaga sulcirostris*	Garrapatero pijuy		13	3	16
42	*Otus kennicottii*	Tecolote occidental		3	-	3
43	*Glaucidium gnoma*	Tecolotito serrano	A	-	1	1
44	*Micrathene whitneyi*	Tecolotito colicorto	E	-	1	1
45	*Icterus gularis*	Bolsero piquigrueso		4	-	4
46	*Cassiculus melanicterus*	Tordo aliamarillo		5	3	8
47	*Pitangus sulphuratus*	Luis bienteveo		2	2	4
48	*Megarhynchus pitangua*	Luis piquigrueso		1	1	2
49	*Polioptila nigriceps*	Perlita sinaloense		1	-	1
50	*Chloroceryle americana*	Martin pescador menor		1	1	2
51	*Buteo nitidus*	Aguililla gris		1	-	1
52	*Columbina inca*	Tortolita pechilisa		6	-	6
53	*Icterus pustulatus*	Bolsero postulado		1	2	3
54	*Melanerpes pygmeaus*	Carpintero pechileonado		1	3	4
55	*Picoides scalaris*	Carpintero mexicano		1	-	1
56	*Trogon elegance*	Trogón colicobrizo		2	1	3
57	*Pachyramphus major*	Mosquero cabezón		1	-	1
58	*Legatus leucophaius*	Mosquero rayado		1	-	1
59	*Tityra semifasciata*	Titira puerquito		1	1	2
60	*Cyanocorax sanblasiana*	Chara colimense		3	2	5
61	*Campephilus guatemalensis*	Carpintero cabecirrojo	Pr	1	2	3
62	*Calocitta formosa*	Urraca hermosa		3	2	5

63	*Turdus rufopaliattus*	Zorzal dorsicanelo	1	-	1
64	*Ptilogonys cinereus*	Capulinero gris	1	-	1
65	*Spizella pallida*	Gorrión indefinido rayado	1	-	1
66	*Melanerpes aurifrons*	Carpintero común	1	-	1
67	*Dendrocincla anabatina*	Trepador rojizo	-	1	1
68	*Amazilia violiceps*	Amazilia occidental	1	2	3
69	*Ceryle torquata*	Martin pescador grande	1	1	2
70	*Dryocopus lineatus*	Carpintero grande crestirrojo	-	1	1
71	*Zimmerius vilissimus*	Mosquerito gritón	-	2	2
72	*Pipilo fuscus*	Rascador pardo	-	2	2
73	*Progne sinaloe*	Golondrina grande Pr bicolor	-	1	1
74	*Polioptila plumbea*	Perlita tropical	-	1	1
75	*Contopus sordidulus*	Contopus occidental	-	1	1
76	*Nyctidromus albicollis*	Tapacamino pucuyo	-	1	1
77	*Coereba flaveola*	Reinita	-	1	1
78	*Myiozetetes similis*	Luis gregario	-	1	1
89	*Icterus chrysater*	Bolsero dorsidorado	-	1	1
80	*Tyrannus melancholicus*	Tirano tropical común	-	1	1
81	*Melanerpes aurifrons*	Carpintero pechileonado común	-	2	2

82	*Mitrephanes phaeocercus*	Mosquerito copetón	-	1	1
83	*Momotus mexicanus*	Momoto coronizare	-	2	2
84	*Trogon mexicanus*	Trogón serrano	-	1	1
85	*Melanerpes formicivorus*	Carpintero arlequín	-	2	2
86	*Colibrí thalassinus*	Chupaflor orejivioleta verde	-	1	1
87	*Turdus grayi*	Zorzal pardo	-	1	1
88	*Sayornis nigricans*	Mosquero negro	-	1	1
89	*Arenaria interpres*	Vuelve piedras común	-	1	1

Nota: Pr: Protección especial; A: Amenazada; E: Probablemente extintas en el medio silvestre; P: En peligro de extinción.

Cuadro 2. Mamíferos registrados en el predio Ocho Amigos durante el periodo primavera (2021-2022).

N°	Nombre científico	Nombre común	Categoría	2021	2022	Total
1	*Didelphis virginiana*	Tlacuache	S/N	1	1	2
2	*Dasypus novemcinctus*	Armadillo	S/N	1	1	2
3	*Desmodos rotundus*	Murciélago vampiro	S/N	5	1	6
4	*Choeronycteris mexicana*	Murciélago	S/N	2	1	3
5	*Canis latrans*	Coyote	S/N	1	-	1
6	*Uricyon cineroargentus*	Zorra gris	S/N	1	1	2

7	*Mephitis macroura*	Zorrillo listado	S/N	1	-	1
8	*Procyon insularis*	Mapache	S/N	1	1	2
9	*Odocoileus virginianus*	Venado cola blanca	S/N	1		1
10	*Spermophilus annulatus*	Ardilla tezmo	S/N	5	2	7
11	*Hodomys alleni*	Rata	S/N	4	2	6
12	*Sciurus aureogaster*	Ardilla gris	S/N	1	2	3
13	*Oryzomys melanotis*	Rata arrocera	S/N	1	-	1
14	*Peromyscus perfulvus*	Ratón	S/N	1	-	1
15	*Sylvilagus cunicularis*	Conejo	S/N	1	-	1
16	*Nasua narica*	Tejón	S/N	-	1	1

Nota: Pr: Protección especial; A: Amenazada; E: Probablemente extintas en el medio silvestre; P: En peligro de extinción.

Cuadro 3. Reptiles y anfibios registrados en el predio Ocho Amigos durante el periodo primavera (2021-2022).

N°	Nombre científico	Nombre común	Categoría	2021	2022	Total
1	*Iguana iguana*	Iguana verde	Pr	1	2	3
2	*Ctenosaura pectinata*	Iguana negra	A	2	4	6
3	*Heloderma suspectum*	Escorpión	A	-	1	1

4	*Bufo marinus*	Sapo marino		1	3	4

Nota: Pr: Protección especial; A: Amenazada; E: Probablemente extintas en el medio silvestre; P: En peligro de extinción.

Cuadro 4. Clasificación taxonómica de las aves registradas en el predio Ocho Amigos durante el periodo primavera (2021-2022).

N°	ORDEN	FAMILIA	GENERO	ESPECIE
1	Podicipediformes	Podicipedidae	Tachybaptus	*dominicus*
2	Ciconiiformes	Ardeidae	Egretta	*thula*
3	Ciconiiformes	Ardeidae	Egreta	*caerulea*
4	Ciconiiformes	Ardeidae	Bubulcus	*ibis*
5	Ciconiiformes	Ardeidae	Casmerodius	*albus*
6	Ciconiiformes	Ardeidae	Trigrisoma	*mexicanum*
7	Ciconiiformes	Ardeidae	Trigrisoma	*lineatum*
8	Anseriformes	Dendrocygninae	Dendrocygna	*autumnalis*
9	Anseriformes	Dendrocygninae	Dendrocygna	*bicolor*
10	Falconiformes	Cathartidae	Coragyps	*atratus*
11	Falconiformes	Cathartidae	Cathartes	*aura*
12	Falconiformes	Pandionidae	Pandion	*haliaetus*
13	Falconiformes	Circinae	Circus	*cyaneus*
14	falconiformes	Buteoninae	Buteo	*nitidus*
15	Falconiformes	Accipitrinae	Accipiter	*striatus*
16	Falconiformes	Accipitrinae	Accipiter	*bicolor*
17	Falconiformes	Buteoninae	Harpyhaliaetus	*solitarius*
18	Falconiformes	Falconidae	Herpetotheres	*cachinnans*
19	Galliformes	Cracidae	Ortalis	*policefala*
20	Galliformes	Rallidae	Fúlica	*americana*

21	Charadriiformes	Charadriidae	Charadrius	*semipalmatus*
22	Charadriiformes	Charadriidae	Charadrius	*montanus*
23	Charadriiformes	Charadriidae	Charadrius	*vociferus*
24	Charadriiformes	Recurvirostridae	Himantopus	*mexicanus*
25	Charadriiformes	Scolopacidae	Calidris	*mauri*
26	Charadriiformes	Scolopacidae	Actitis	*macularía*
27	Charadriiformes	Scolopacidae	Limosa	*haemastica*
28	Charadriiformes	Scolopacidae	Numenius	*tahitiensis*
29	Charadriiformes	Scolopacidae	Gallinago	*gallinago*
30	Charadriiformes	Scolopacidae	Heteroscelus	*incanus*
31	Charadriiformes	Scolopacidae	Arenaria	*interpres*
32	Columbiformes	Columbidae	Zenaida	*macroura*
33	Columbiformes	Columbidae	Zenaida	*asiatica*
34	Columbiformes	Columbidae	Columba	*fasciata*
35	Columbiformes	Columbidae	Leptotila	*verreauxi*
36	Columbiformes	Columbidae	Columbina	*talpacoti*
37	Columbiformes	Columbidae	Columbina	*inca*
38	Psittaciformes	Psittacidae	Ara	*militaris*
39	Psittaciformes	Psittacidae	Amazona	*finschi*
40	Psittaciformes	Psittacidae	Aratinga	*canicularis*
41	Cuculiformes	Cuculidae	Piaya	*cayana*
42	Cuculiformes	Cuculidae	Crotophaga	*sulcirostris*
43	Strigiformes	Strigidae	Otus	*kennicottii*
44	Strigiformes	Strigidae	Glaucidium	*gnoma*
45	Strigiformes	Strigidae	Micrathene	*whitneyi*
46	Apodiformes	Trochilidae	Cynanthus	*sordidus*

47	Apodiformes	Trochilidae	Amazilia	*violiceps*
48	Apodiformes	Trochilidae	Colibrí	*thalassinus*
49	Piciformes	Picidae	Melanerpes	*pygmeaus*
50	Piciformes	Picidae	Melanerpes	*aurifrons*
51	Piciformes	Picidae	Melanerpes	*formicivorus*
52	Piciformes	Picidae	Campephilus	*guatemalensis*
53	Piciformes	Picidae	Dryocopus	*lineatus*
54	Piciformes	Picidae	Picoides	*scalaris*
55	Coraciiformes	Alcedinidae	Chloroceryle	*americana*
56	Coraciiformes	Alcedinidae	Ceryle	*torquata*
57	Trogoniformes	Trogonidae	Trogon	*elegance*
58	Trogoniformes	Trogonidae	Trogon	*mexicanus*
59	Passeriformes	Tyrannidae	Zimmerius	*vilissimus*
60	Passeriformes	Tyrannidae	Mitrephanes	*phaeocercus*
61	Passeriformes	Tyrannidae	Sayornis	*nigricans*
62	Passeriformes	Tyrannidae	Pitangus	*sulphuratus*
63	Passeriformes	Tyrannidae	Megarhynchus	*pitangua*
64	Passeriformes	Tyrannidae	Legatus	*leucophaius*
65	Passeriformes	Tyrannidae	Contopus	*sordidulus*
66	Passeriformes	Tyrannidae	Myiozetetes	*similis*
67	Passeriformes	Tyrannidae	Tyrannus	*melancholicus*
68	Passeriformes	Dendrocolaptidae	Dendrocincla	*anabatina*
69	Passeriformes	Tityrinae	Tityra	*semifasciata*
70	Passeriformes	Tityrinae	Pachyramphus	*major*
71	Passeriformes	Hirundinidae	Progne	*sinaloe*
72	Passeriformes	Corvidae	Cyanocorax	*sanblasiana*

73	Passeriformes	Corvidae	Calocitta	*formosa*
74	Passeriformes	Turdinae	Turdus	*rufopaliattus*
75	Passeriformes	Turdinae	Turdus	*grayi*
76	Passeriformes	Coerebidae	Coereba	*flaveola*
77	Passeriformes	Icterinae	Icterus	*pustulatus*
78	Passeriformes	Icterinae	Icterus	*chrysater*
79	Passeriformes	Icterinae	Icterus	*gularis*
80	Passeriformes	Icterinae	Cacicus	*melanicterus*
81	Passeriformes	Fringillidae	Spizella	*pallida*
82	Passeriformes	Fringillidae	Pipilo	*fuscus*
83	Passeriformes	Ptilogonatidae	Ptilogonys	*cinereus*
84	Caprimulgiformes	Caprimulgidae	Nyctidromus	*albicollis*
85	Coraciiformes	Momotidae	Momotus	*mexicanus*
86	Tinamiformes	Sylviinae	Polioptila	*nigriceps*
87	Tinamiformes	Sylviinae	Polioptila	*plúmbea*

Cuadro 5. Clasificación taxonómica de los mamíferos registrados en el predio Ocho Amigos durante el periodo primavera (2021-2022).

N°	ORDEN	FAMILIA	GENERO	ESPECIE
1	Didelphimorphia	Didelphidae	Didelphis	*virginiana*
2	Cingulata	Dasypodidae	Dasypus	*novemcinctus*
3	Artiodactyla	Cervidae	Odocoileus	*virginianus*
4	Lagomorpha	Leporidae	Sylvilagus	*cunicularis*
5	Chiroptera	Phillostomidae	Desmodus	*rotundus*
6	Chiroptera	Phillostomidae	Choeronycteris	*mexicana*
7	Carnívora	Canidae	Canis	*latrans*
8	Carnívora	Canidae	Urocyon	*cineroargentus*

9	Carnívora	Mephitidae	Mephitis	*macroura*
10	Carnívora	Procyonidae	Procyon	*insularis*
11	Carnívora	Procyonidae	Nasua	*narica*
12	Rodentia	Sciuridae	Spermophilus	*annulatus*
13	Rodentia	Sciuridae	Sciurus	*aureogaster*
14	Rodentia	Muridae	Hodomys	*alleni*
15	Rodentia	Cricetidae	Oryzomys	*melanotis*
16	Rodentia	Cricetidae	Peromyscus	*perfulvus*

Cuadro 6. Taxonomía de los reptiles y anfibios registrados en el predio Ocho Amigos durante el periodo primavera (2021-2022).

N°	ORDEN	FAMILIA	GENERO	ESPECIE
1	Squamata	Iguanidae	Iguana	iguana
2	Squamata	Iguanidae	Ctenosaura	pectinata
3	Squamata	Helodermatidae	Heloderma	suspectum
4	Anura	Bufonidae	Bufo	marinus

Continuación se describen una serie de propuestas de manejo orientadas a la conservación de la fauna silvestre presente en el predio “Ocho Amigos” del municipio de Tomatlán, Jalisco (Cuadro 7).

Cuadro 7. Propuestas de manejo para su implementación en el predio bajo estudio.

Acciones	Plazos		
	Corto	Mediano	Largo
Monitorear las especies identificadas en este trabajo, dando énfasis a las que se encuentran en categoría de riesgo, con el fin de identificar los factores que reducen sus poblaciones.	X		
Evaluar las condiciones de la vegetación, suelo y agua, para determinar la situación del ecosistema.		X	
Realizar recorridos para controlar saqueos de flora y fauna.	X	X	X

Normar la cacería de fauna silvestre en la zona estableciendo vedas, además de otorgar permisos de caza a personas que cumplan los lineamientos establecidos por SEMARNAT.	X	X	X
Realizar vigilancia y sanciones legales a personas que exploten la fauna silvestre.	X	X	X
Establecer módulos de reproducción y liberación de individuos de especies encontradas en alguna categoría de riesgo.	X	X	X
Impulsar medidas de limpieza preventivas y de regulación en las poblaciones vecinas al predio “Ocho Amigos”.	X	X	X
Impartir pláticas con personas adultas de las comunidades, acerca de la importancia ambiental de la fauna silvestre.	X	X	
Organizar seminarios con alumnos de preparatoria, secundaria y primaria.		X	X
Visitar las comunidades organizando festivales alusivos a la naturaleza, para ilustrar la fauna y los beneficios que nos brindan.			X
Capacitar a los profesores para que impartan cursos de educación ambiental a todos los niveles educativos.			X
Repartir volantes y pegar propaganda en las calles de los pueblos con información de educación ambiental.		X	
Dar a conocer las especies endémicas y las encontradas en riesgo, con el fin de solicitar cuidado especial, de parte de las personas.		X	X
Implementar centros de reproducción de fauna silvestre con aprovechamiento cinegético.		X	X
Impulsar el registro de UMA`s de animales silvestres para proteger especies y repoblar el medio natural.		X	X
Gestionar apoyos de instancias gubernamentales e internacionales para proteger especies en riesgo y endémicas.		X	
Gestionar el pago por servicios ambientales.	X	X	
Reducir el uso de pesticidas químicos reemplazándolos por plaguicidas biológicos.	X	X	X
Fomentar el uso de abonos orgánicos en las parcelas.	X	X	X

Identificar y delimitar zonas específicas dentro del predio con aptitudes para realizar actividades ecoturísticas y productivas.		X	
Vigilar que se cumplan las leyes ambientales establecidas por SEMARNAT en la construcción de obras de infraestructura.	X	X	X
Evitar que se establezcan viviendas en lugares donde la población de fauna es elevada.	X	X	X
Vigilar y evitar que se tire basura y desechos tóxicos, dentro y cerca del predio.	X	X	X
Establecer señalamiento que adviertan la presencia de fauna, cruce, nidos, madrigueras, etc.	X		
Construir abrevaderos para la fauna en puntos estratégicos dentro del predio.	X		

Los resultados obtenidos señalan una amplia diversidad faunística; lo cual coincide con el patrón de comportamiento reportado por Jaman et al. (2023) quienes señalan que en otros ecosistemas similares el grupo más representativo son las aves, seguidas por mamíferos, reptiles y anfibios. De la misma forma la CONANP (2010) reporta la misma tendencia para la reserva de la Biosfera Sierra De Manantlán. Comparando los resultados obtenidos en este estudio, con otros similares, cabe mencionar que el número de especies identificadas, supera en 45 % de las reportadas por Maqueda y Zacarías (2000), para el Parque Estatal Sierra Patlachique, dicho parque tiene una superficie cinco veces mayor que el área de estudio lo cual puede repercutir en las diferencias encontradas entre ambos estudios en términos del número de especies registradas, mismo que fue mayor en la presente; además, lo anterior posiblemente se debe a que dicho parque cuenta con una precipitación menor y vegetación de matorral Crassicuale; ésta comunidad vegetal, completamente diferente a la reportada en el área del presente estudio, la cual corresponde a selva mediana caducifolia y bosque de encino, los cuales pueden, potencialmente aportar un mayor número de nichos ecológicos que la vegetación de zonas áridas y semiáridas (Pillay et al., 2022). Arizmendi (1991), reporta cuatro veces más especies para la reserva de Chamela, que las identificadas en este trabajo; considerando que se trata de dos ecosistemas similares, la inferioridad de especies identificadas en este estudio se debe posiblemente a que el predio es 20 veces más pequeño en superficie que dicha reserva, además de que en dicho trabajo se realizó una intensidad de muestreo mayor que en el presente trabajo.

Las especies de aves identificadas en este estudio equivalen al 16 % de las reportadas por Ramírez (2007) para el estado de Jalisco. La poca incidencia de anfibios y reptiles se pudo deber a que en primavera dichos organismos están ocultos, siendo más comunes en otras

épocas del año, producto de sus hábitos reproductivos y alimenticios (Green, 2017). Con el número de especies de aves y mamíferos encontrados en este monitoreo, se confirma el patrón de comportamiento de los grupos taxonómicos en la conformación de comunidades de fauna silvestre en éste y otro tipo de ecosistemas.

En el presente estudio se reportan 15 especies en algún estatus de riesgo (Semarnat, 2010) lo cual contrasta con los reportado por Romero y Morales (2000) para el Parque Estatal Sierra de Tepotzotlán quienes reportan solo siete especies en alguna categoría de riesgo. Esto pudo deberse a que en dicho parque se identificó un menor número de especies, además no se encontraron reptiles en situación de riesgo; otro factor importante de resaltar es la presión social sobre los recursos naturales que sufre dicho parque, la cual es mayor que en el área de estudio del presente trabajo.

En cuanto a las especies endémicas registradas se tuvo un total de 13 especies de las cuales el 31 % corresponde al grupo de mamíferos, 7.8 % para aves, y 33 % en reptiles, mientras que para anfibios no hubo registros; este patrón de comportamiento se asemeja al endemismo reportado por Pérez-Gil et al. (1995) para México quienes indican un 33 % para mamíferos, 8 % para aves y 51 % para reptiles.

En el presente trabajo se identificó una especie que la NORM-059 SEMARNAT-2010, incluye en la categoría de riesgo: “probablemente extinta en el medio silvestre” (E), ésta es *Micrathene whitneyi*, “Tecolotito Colicorto”, dicha especie fue identificada por medio de un individuo capturado en la red. La presencia de una especie considerada extinta en el medio silvestre realza la necesidad de conservación dentro del área estudiada y en los espacios adyacentes.

Por último, las propuestas de manejo señaladas en el presente trabajo se asemejan a las reportadas por Maqueda y Zacarías (2000) para el Parque Estatal Sierra Patlachique; sin embargo, el tipo de tenencia de la tierra es diferente; ambos estudios difieren con lo propuesto por Romero y Morales (2000) quienes recomiendan la incorporación del ejército en las áreas naturales protegidas con la finalidad de protegerlas; particularmente en el Parque Estatal Sierra de Tepotzotlán.

Nuestras recomendaciones de manejo coinciden con las reportadas por la UACH (2009) quien recomienda como herramienta importante el establecimiento de un programa de educación ambiental para proteger aves acuáticas en la comunidad de Sayula, Jalisco; sin embargo, no plantea la importancia de establecer centros de reproducción y liberación de especies como se hace en el presente. Por otra parte, Velasco y Hernández (2010) coinciden con algunas recomendaciones generadas en este estudio; sin embargo, no recomiendan ninguna actividad de aprovechamiento sustentable como lo estipula el contexto internacional

y nacional actual, en materia de conservación de la vida silvestre a partir de su aprovechamiento sustentable.

Conclusiones

Se logró determinar la riqueza de especies presentes en el predio "Ocho Amigos", del municipio en Tomatlán, Jalisco, este trabajo permitió documentar un total de 109 especies pertenecientes a cuatro grupos taxonómicos (aves, mamíferos, reptiles y anfibios), distribuidas en 48 familias y 26 órdenes, lo que confirma la importancia biológica del área como refugio para la conservación de la biodiversidad regional. Las aves constituyeron el grupo con mayor riqueza específica, seguidas por los mamíferos, reptiles y anfibios, patrón que coincide con el registrado en otros ecosistemas tropicales del occidente de México. La heterogeneidad de la vegetación, integrada por cuerpos de agua, selva mediana, bosque de encino, áreas agrícolas y pastizales inducidos, favorece la disponibilidad de recursos y nichos ecológicos que sustentan comunidades faunísticas diversas. La identificación de 15 especies incluidas en alguna categoría de riesgo conforme a la NOM-059-SEMARNAT-2010, así como el registro de especies endémicas y de una especie catalogada como probablemente extinta en el medio silvestre, evidencia el alto valor de conservación del predio y resalta su importancia para la protección de especies prioritarias. Estos resultados indican que el área constituye un sitio estratégico para la conservación de la fauna silvestre en la costa de Jalisco y contribuye al mantenimiento de poblaciones de especies con especial relevancia ecológica y de conservación. Los resultados obtenidos proporcionan una línea base para el diseño de programas de monitoreo de largo plazo y para la implementación de estrategias de manejo orientadas a conservar la diversidad biológica del predio. En este sentido, el fortalecimiento de las acciones de vigilancia, educación ambiental, restauración del hábitat y aprovechamiento sustentable permitirá consolidar el proyecto ecoturístico como una alternativa compatible con la conservación de la fauna silvestre y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos que ésta proporciona.

Literatura citada

Álvarez-Gallardo, H., Velázquez-Roque, A., Villaseñor-González, F., Kjelland, M. E., & Romo-García, S. (2024). Aspiración de ovocitos por laparoscopía con fines de conservación y mejoramiento genético. En A. Trejo Córdova, D. Ambriz García, M. del C. Navarro Maldonado, & B. Vargas Miranda (Comps.), *Estrategias para recuperar mamíferos en riesgo* (pp. 27–43). Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa.

Aranda, S. M. J. (1981). Rastros de los Mamíferos Silvestres de México. Departamento de Zoología. Instituto de Historia Natural. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. 198 p.

Arizmendi, C. (1991). Avifauna de la Región de Chamela, Jalisco. Instituto de Biología, UNAM, México D.F. 62 p.

Boitani, L. y Bartoli, S. (1985). Guía de Mamíferos. Ediciones Grijalbo, S.A. Barcelona España. 511 p.

Casas, G. y Clarence J. M. (1979). Anfibios y Reptiles de México. Editorial Limusa. 85 p.

Chen, J., & Wang, Y. (2024). Effects of habitat fragmentation on bird behavior and extinction mechanisms. *International Journal of Molecular Zoology*, 14(2): 97-110. https://doi.org/10.5376/ijmz.2024.14.0011

CONANP (2010). Biodiversidad de la Reserva de la Biósfera de Manantlán. Dirección Electrónica: http://manantlan.conanmp.gob.mx

Green, D. M. (2017). Amphibian breeding phenology trends under climate change: predicting the past to forecast the future. *Global change biology*, 23(2): 646-656. https://doi.org/10.1111/gcb.13390

Halffter, G. (2017). La zona de transición mexicana y la megadiversidad de México: Del marco histórico a la riqueza actual. *Dugesiana*, 24(2): 77-89.

Hoefer, S., McKnight, D. T., Allen-Ankins, S., Nordberg, E. J., & Schwarzkopf, L. (2023). Passive acoustic monitoring in terrestrial vertebrates: a review. *Bioacoustics*, 32(5): 506-531.

Jaman, M. F., Alam, M. M., Shome, A. R., Saha, A., Rabbe, M. F., Rana, M. A. S., ... & Rahman, M. M. (2023). Diversity and community structure of wild vertebrates in the Sandwip Island of Bangladesh. *Tropical Ecology*, 64(2): 224-237. https://doi.org/10.1007/s42965-022-00262-w

Maqueda, G. M. y Zacarías, F. M. (2000). Clasificación y Uso de la Fauna Silvestre del Parque Estatal Sierra Patlachique, en el Estado de México. Tesis de licenciatura. UACh. Chapingo, Texcoco, Edo. De México. 115 p.

Nóbrega Alves, R.R. (2012). Relationships between fauna and people and the role of ethnozoology in animal conservation. *Ethnobiology and conservation*, 1(2): 1-69. https://doi.org/10.15451/ec2012-8-1.2-1-69

Péreza, C. P. R., Duránb, A. G., & Cortésc, H. C. M. (2019). Propuesta de Estrategia Didáctica:"México País Megadiverso". *Latin American Journal of Science Education*, 6: 12039.

Pérez-Gil, R., Sánchez, M. N. y Torres, B. H. (1995). Importancia Económica de los Vertebrados de México. CONABIO. México, D. F. 146 p.

Peterson, T.R. y Chalif, L.E. (1998). Aves de México, Guía de Campo. México D.F. 473 p.

Pillay, R., Venter, M., Aragon-Osejo, J., González-del-Pliego, P., Hansen, A. J., Watson, J. E., & Venter, O. (2022). Tropical forests are home to over half of the world's vertebrate species. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 20(1): 10-15. https://doi.org/10.1002/fee.2420

Ramírez-Albores, J. E. (2007). Avifauna de cuatro comunidades del oeste de Jalisco, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 78(2): 439-457.

Romero, B. M. y Morales, V. J. (2000). Inventario de la Fauna Silvestre en el Parque Estatal Sierra de Tepotzotlán Estado de México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Edo. De México. 100 p.

Roy, P., Pal, S. C., Chakrabortty, R., Chowdhuri, I., Saha, A., & Shit, M. (2023). Effects of climate change and sea-level rise on coastal habitat: Vulnerability assessment, adaptation strategies and policy recommendations. *Journal of Environmental Management*, *330*: 117187. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117187

Sánchez-Brenes, R. J., & Monge Meza, J. (2024). Diversidad de mamíferos silvestres en agroecosistemas con café, Rincón de Mora, San Ramón, Alajuela, Costa Rica. *Acta zoológica mexicana*, 40: 1-23. https://doi.org/10.21829/azm.2024.4012592

SEMARNAT (2010). Norma Oficial Mexicana: NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental de Especies nativas de México de flora y fauna silvestres en Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio de lista. México, D.F. 77 p.

Tan, W. C., Herrel, A., & Rödder, D. (2023). A global analysis of habitat fragmentation research in reptiles and amphibians: what have we done so far?. *Biodiversity and Conservation*, *32*(2): 439-468.

Turot, A., Boer, C., Matius, P., Marwa, J., Suba, R. B., Suhardiman, A., ... & Ruslim, Y. (2025). Wildlife diversity of Malagufuk Forest for sustainable ecotourism and community-

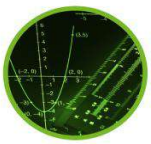
based forest management in Southwest Papua, Indonesia. *Biodiversitas: Journal of Biological Diversity*, *26*(5): 2320-2331. https://doi.org/10.13057/biodiv/d260529

Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales (UACH). (2010). *Primer informe anual 2009–2010*. Universidad Autónoma Chapingo. https://dicifo.chapingo.mx/pdf/1er_informe_gil_2009-2010.pdf

Velasco, M. I. y Hernández R. D. (2010). Inventario de Fauna Silvestre, en el Parque Ecotlaixpan, San Miguel Tlaixpan, Texcoco, Edo. De México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Edo. De México. 66 p.

TEMÁTICA 10. POSCOSECHA, CALIDAD Y AGROINDUSTRIA

Áreas Temáticas



Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible



Economía Agrícola, Desarrollo Territorial, Tecnología e Innovación Social



Ciencias Biológicas y Agronómicas



Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global



Desarrollo rural, agroecología y cambio climático

Calidad física, química y mineral de frutos de *Solanum lycopersicum* L. provenientes de plantas tratadas con extractos vegetales

Aracely Martínez-Bautista[57], Eduardo Osorio-Hernández, Sarahi Rubio-Tinajero[58], Karen Jazmin Martínez-Netro[59]

Resumen

El aumento de la demanda del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de calidad y libre de pesticidas, ha generado la necesidad de alternativas que garanticen la producción sin afectar el medio ambiente ni la salud. En este sentido, la aplicación de extractos vegetales como bioestimulantes es una opción para el aumento de peso en los frutos debido a los diversos compuestos bioactivos que poseen. Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue evaluar el potencial bioestimulante de los tratamientos sobre la calidad física, química y mineral de frutos de *Solanum lycopersicum* L. Se aplicaron extractos vegetales etanólicos de flores de *Tagetes erecta*, frutos maduros de *Azadirachta indica* y hojas de *Ocimum basilicum* a plantas de tomate. Posteriormente, se pesó y se midió el diámetro polar y ecuatorial, se registró el pH y los ºBrix de los frutos frescos. Asimismo, se determinó el contenido de minerales de los frutos secos provenientes de las plantas de tomate tratadas. Para determinar diferencia significativa entre tratamientos se utilizó una comparación de medias de Tukey (p=0.05). Las plantas tratadas con los extractos de *A. indica* y *O. basilicum* obtuvieron frutos con mayor peso (79.00 y 94.83 g) en comparación con el testigo (30.95 g) además, del contenido de potasio (4.117 y 4.030 %) mineral esencial para el tamaño, peso y calidad de los frutos, comparado con el testigo (3.760 %). Los tratamientos de *Azadirachta indica* y *Ocimum basilicum* son una alternativa sostenible como bioestimulante para mejorar calidad física y contenido mineral en frutos de tomate.

Palabras clave: *Azadirachta indica*, bioestimulantes, compuestos bioactivos, *Ocimum basilicum*, *Tagetes erecta*

Abstract

[57] Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario, Campus, Cd. Victoria, Tamaulipas, México. CP. 87149. aracelymartinezbautista@gmail.com; eosorio@docentes.uat.edu.mx
[58] Unidad Académica Multidisciplinaria Mante, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Blvd. Enrique Cárdenas González No. 1201 Pte, Cd. Mante, Tamaulipas, México. C.P. 89840. sarubio@uat.edu.mx
[59] Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. Insurgentes Sur 489, P-X, Col. Hipódromo, Cuauhtémoc, CDMX. CP. 06100. karen.martinez.i@senasica.gob.mx

The increased demand for high-quality, pesticide-free tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) has generated a need for alternatives that guarantee production without harming the environment or health. In this regard, the application of plant extracts as biostimulants is an option for increasing fruit weight due to their diverse bioactive compounds. Therefore, the objective of this research was to evaluate the biostimulant potential of treatments on the physical, chemical, and mineral quality of *Solanum lycopersicum* L. fruits. Ethanolic plant extracts of *Tagetes erecta* flowers, ripe *Azadirachta indica* fruits, and *Ocimum basilicum* leaves were applied to tomato plants. Subsequently, the polar and equatorial diameters of the fresh fruits were weighed, and their pH and °Brix were measured. The mineral content of the dried fruits from the treated tomato plants was also determined. To determine significant differences between treatments, a Tukey's test for mean comparison was used (p=0.05). Plants treated with the *A. indica* and *O. basilicum* extracts produced heavier fruit (79.00 and 94.83 g, respectively) compared to the control (30.95 g). Furthermore, the potassium content (4.117 and 4.030 %), an essential mineral for fruit size, weight, and quality, was significantly higher compared to the control (3.760 %). The *Azadirachta indica* and *Ocimum basilicum* treatments represent a sustainable alternative as biostimulants to improve the physical quality and mineral content of tomato fruit.

Keywords: *Azadirachta indica*, biostimulants, bioactive compounds, *Ocimum basilicum*, *Tagetes erecta*

Introducción

Solanum lycopersicum L. es una de las hortalizas ampliamente consumida a nivel mundial (Ajayi y Hassan, 2019), sus frutos se comercializan frescos, secos, procesados como salsas, pastas, zumos y conservas (Yeshiwas y Tolessa, 2018). La demanda de los consumidores por frutos de calidad, libres de químicos y con mayor tiempo de anaquel, ha originado la búsqueda de técnicas naturales, ecológicas, seguras y antimicrobianas (Pinela y Ferreira, 2017). La demanda de los consumidores por frutos de calidad, libres de químicos y con mayor tiempo de anaquel, ha originado la búsqueda de técnicas naturales, ecológicas, seguras y antimicrobianas (Mora *et al*., 2021). En este sentido, resulta importante aumentar el rendimiento de los cultivos para satisfacer las demandas de la población y al mismo tiempo proteger el medio ambiente de los impactos adversos, por lo que el uso de extractos vegetales con propiedades bioestimulantes debido a sus compuestos bioactivos resulta una alternativa para disminuir la aplicación de químicos (Espinosa-Antón *et al* 2025).

Un bioestimulante es un producto formulado de origen biológico, aumenta la productividad vegetal como consecuencia de las propiedades de sus compuestos bioactivos y no como consecuencia exclusiva de la presencia de nutrientes esenciales para las plantas (Yakhin *et al*., 2017). Entre los beneficios que aportan en las plantas se encuentran: aumento de la provisión de biomoléculas de señalización que desencadenan respuestas de defensa y modulación del metabolismo redox, mejora la biodisponibilidad de los nutrientes y el suministro directo de nutrientes esenciales (Medrano-Macías *et al*., 2022; Baltazar *et al*., 2021).

La mayoría de los compuestos que contienen los bioestimulantes son naturales de ecosistemas terrestres y acuáticos (Cuevas y Martinez-Trinidad, 2025), así como metabolitos de origen vegetal y microbiano, por lo que la mayoría se consideran generalmente seguros, de esta manera se ha propuesto que los bioestimulantes pueden emplearse como productos ecológicos para la agricultura sostenible (Vijayanand *et al*., 2014).

Para la elaboración de los bioestimulantes se emplean como materia prima las partes superiores de la planta, incluyendo semillas, hojas y raíces (Lucini *et al*., 2015). Se ha documentado que el aumento de la características de crecimiento de las plantas se atribuye a las hormonas vegetales, como la auxina, presentes en los extractos, así como a la implicación de varios procesos estimulantes dentro del sistema vegetal después de la aplicación (Lucini *et al*., 2018). Mediante la aplicación foliar del extracto de *Polygonum minus* se incrementó la tolerancia a la sequía en el maíz al regular el sistema de defensa osmótico y antioxidante (Han *et al*., 2024).

El efecto de los bioestimulantes es acumulativo en las plantas, ya sea mediante la aplicación foliar o empapamiento del suelo, estos contienen diversidad de metabolitos secundarios que participan en diferentes vías metabólicas, cruciales en la estimulación de mecanismos reguladores internos y como consecuencia, promueven el desarrollo vegetal y aumentan la producción (Ali *et al*., 2019; ElSayed *et al*., 2022). Los bioestimulantes vegetales basados en extractos vegetales, son considerados cada vez más en los sistemas de producción con el fin de modificar los procesos fisiológicos en las plantas para incrementar la productividad (Du, 2015). Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar el potencial bioestimulante de extractos vegetales sobre la calidad física, química y mineral de frutos de *Solanum lycopersicum* L.

Materiales y métodos

Establecimiento del experimento y aplicación de los tratamientos

El experimento se llevó a cabo en noviembre del 2024, en el invernadero de la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Autónoma de Tamaulipas (23°42'54.5"N 99°09'13.6"W). Se utilizaron plantas de tomate saladette variedad 8579. Se estableció un diseño completamente al azar, con cuatro tratamientos cada uno con cuatro repeticiones. Los tratamientos evaluados se describen en el Cuadro 1, se utilizaron extractos vegetales etanólicos de flores de *Tagetes erecta*, frutos maduros de *Azadirachta indica* y hojas de *Ocimum basilicum*. La aplicación de los tratamientos se realizó en el momento del trasplante, las raíces de las plántulas fueron sumergidas por 1 min en los tratamientos correspondientes. Posteriormente, los tratamientos se volvieron a aplicar vía foliar a los 40 y 60 después del trasplante (durante el inicio de la floración, desarrollo y llenado del fruto).

Cuadro 1. Tratamientos evaluados en el experimento.

Nº	Tratamiento	Descripción	Dosis
1	TE	Extracto de *Tagetes erecta*	5 L ha^{-1}
2	AI	Extracto de *Azadirachta indica*	5 L ha^{-1}
3	OB	Extracto de *Ocimum basilicum*	5 L ha^{-1}
4	Testigo	Plantas no tratadas con extractos vegetales	No aplica

Fuente: Elaboración propia

Calidad física y química de frutos de Solanum lycopersicum L.

Para evaluar el efecto de los extractos vegetales sobre la calidad de los frutos con un vernier digital (RexQualis, Gerenic) se midió el diámetro polar (DP) y ecuatorial (DE). Se utilizó una báscula digital (Lincky, SF-400) para el peso de los frutos, con un refractómetro digital (TROVEQ, Digital Brix Refractometer) se midió el porcentaje de sólidos solubles (º Brix) y con un pH-metro digital (Penxua, Digital PH Meter) se registró el pH. Estas variables se midieron en cuatro frutos por tratamiento.

Contenido de los minerales de frutos de Solanum lycopersicum L.

Para el análisis del contenido de los minerales de los frutos, se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía (Epsilon 1, Panalytical, Holanda), para ello se utilizaron 2 g del material vegetal (tres repeticiones por tratamiento), previamente secado en una estufa durante 72 h a 50 °C y pulverizado. Posteriormente, cada muestra se colocó en un horno a 600 ºC por 2 h para así obtener el porcentaje de ceniza, estos pasos se repitieron tres veces. El contenido de los minerales se obtuvo mediante las siguientes ecuaciones (1 y 2):

Contenido del mineral = (Porcentaje del mineral ÷ 100) × Porcentaje de ceniza (1)

Porcentaje de ceniza= [(peso del crisol con la muestra de ceniza - peso del crisol sin la muestra) / 2 g] × 100 (2)

Análisis estadístico

Se utilizó un análisis de varianza y cuando se encontró diferencia significativa entre tratamientos, se llevó a cabo una comparación de medias con la prueba de rango múltiple de Tukey (p=0.05), mediante el paquete estadístico SAS.

Resultados y discusión

Los frutos provenientes de plantas de *Solanum lycopersicum* L. tratadas con extractos vegetales mostraron características físicas con diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 1). El tratamiento testigo (plantas no tratadas) obtuvo frutos con menor diámetro polar y ecuatorial, así como peso promedio inferior respecto a los frutos de las plantas tratadas con los extractos vegetales. Las plantas tratadas con los extractos de *A. indica* y *O. basilicum* mostraron frutos con mayor peso. Por otra parte, las características químicas no presentaron efecto de los tratamientos.

Los resultados obtenidos son similares a los reportados por Nahak y Sahu, (2015) quienes indicaron que el extracto de *A. indica* aumentó el número de ramas, hojas, yemas, flores y frutos, así como la altura de la planta de tomate, además de ser eficaz contra enfermedades fúngicas en comparación con los controles en condiciones de campo. Diacono *et al*. (2026) obtuvieron un incremento del 36 % en el peso del fruto de tomate al aplicar compost + extractos de albahaca en comparación con el fertilizante orgánico comercial. La aplicación de los tratamientos vía foliar permite una interacción inmediata de los compuestos bioactivos presentes en los extractos vegetales con los tejidos vegetales de las plantas, esto debido a su rápida absorción mediante los estomas y las cutículas (Youssef *et al*., 2022; Han *et al*., 2024). De igual manera, el uso de extractos vegetales en las diferentes etapas fenológicas de los cultivos influye de forma positiva sobre el crecimiento y la productividad (Godlewska *et al*., 2021; Han *et al*., 2024).

Diversos estudios han documentado que la aplicación de extractos vegetales aumenta el peso de los frutos de los cultivos: las plantas de pimiento tratadas con el extracto de *Flourensia retinophylla* mostraron mayor estimulación en el crecimiento longitudinal del tallo así como

la acumulación total de materia seca y el volumen de la raíz, lo que indujo al incremento del peso fresco, el volumen y el rendimiento de los frutos, demostrando valores similares o superiores a los biorreguladores comerciales (ácido gieberélico, ácido indolacético y 6-bencilaminopurina) (Jasso de Rodríguez *et al*., 2023). Los extractos de *Verbesina sphaerocephala* y *Verbesina fastigiata* aumentaron el crecimiento de las hojas, el número de coronas y la longitud de las raíces, asimismo, el desarrollo reproductivo (número de yemas, flores y frutos) de las plantas de fresa (Velasco-Ramírez *et al*. 2022).

El efecto bioestimulante de los extractos vegetales sobre el crecimiento y la productividad de las plantas no es el resultado de un solo compuesto bioactivo, sino de la sinergia y acción combinada de diversos compuestos como polifenoles, fitohormonas, aminoácidos, esteroles, terpenoides y vitaminas (Ahmad *et al*., 2022; Han *et al*., 2024; Jasso de Rodríguez *et al*., 2024). Diversos autores han documentado la presencia de metoxiflavonas y flavonoles extraídos de extractos de semillas de *A. indica* (Hernandez-Trejo *et al.*, 2021). Venmathi *et al*. (2021) encontraron en extractos acuosos de *A. indica*, flavonoles como miricetina 3-O-galactósido, quercetina y kaempferol; ácidos hidroxicinamicos como ácido p-cumárico. En el mismo sentido, Ogidi *et al*. (2021) obtuvieron flavonoides, saponinas, taninos, esteroides, glucósidos, terpenoides y alcaloides en extractos acuosos y metanólicos de las hojas de *A. indica*. Por su parte, Malar *et al*. (2020) identificaron alcaloides, saponinas, taninos, antroquinonas, flavanoides y fenólicos en extractos con metanol mientras que solo encontraron alcaloides, esteroides, saponinas y flavonoides en extractos acuosos. Del extracto de *O. basilicum* se ha reportado la presencia de ácido rosmarínico y ácido cafeico así como de otros compuestos como el ácido clorogénico, el ácido vainílico, la epicatequina, la rutina, el ácido cinámico, el ácido 2,5-dihidroxibenzoico, el ácido 4-hidroxibenzoico, el ácido p-cumárico, el ácido clorogénico, el ácido 3,4-dihidroxibenzoico, el ácido gálico, el ácido chicórico, el ácido caftárico (Qasem *et al*., 2023). Teofilović *et al*. (2021) identificaron compuestos como; ácido rosmarínico, quercetina, ácido clorogénico, ácido vanílico, naringenina, ácido cinámico y ferúlico.

Cuadro 1. Características físicas y químicas de frutos de *Solanum lycopersicum* L. provenientes de plantas tratadas con extractos vegetales.

Tratamientos	DP (cm)	DE (cm)	P (g)	Brix (º)	pH
T. erecta	55.41 a	44.66 a	62.35 b	4.85 a	3.87 a
A. indica	60.40 a	49.73 a	79.00 ab	5.18 a	3.85 a
O. basilicum	65.16 a	51.74 a	94.83 a	5.75 a	4.17 a
Testigo	42.30 b	35.74 b	30.95 c	4.83 a	4.16 a

Valor p=0.05	0.001	0.0004	0.0001	0.4477	0.4953

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (p=0.05).
Fuente: Elaboración propia

Se identificaron seis minerales de los frutos provenientes de plantas de *Solanum lycopersicum* L. tratadas con extractos vegetales, de los cuales el fósforo, el azufre, el cloro y el potásico mostraron diferencias significativas. De acuerdo con Han *et al*. (2024) las concentraciones de macro y micronutrientes en extractos vegetales suele ser insuficientes para influir en las respuestas fisiológicas en las plantas. Por otra parte, Vinković *et al*. (2012) documentaron que las plantas de tomate tratadas con bioestimulantes tenían mayores contenidos de N, P, K, CA y Mg en la materia seca vegetal que las plantas de control, informaron que la aplicación de bioestimulantes antes del trasplante originó plantas con mayor adaptación a las condiciones de invernadero o en el campo.

Cuadro 2. Contenido mineral (%) de frutos de *Solanum lycopersicum* L. provenientes de plantas tratadas con extractos vegetales.

Tratamientos	Mg	P	S	Cl	K	Ca
O. basilicum	1.507 a	0.227 b	0.153 a	0.307 b	4.117 a	0.513 a
T. erecta	1.523 a	0.240 a	0.137 b	0.333 a	4.017 ab	0.503 a
A. indica	1.217 a	0.223 b	0.133 b	0.340 a	4.030 ab	0.513 a
Testigo	1.207 a	0.220 b	0.130 b	0.353 a	3.760 b	0.490 a
Valor p=0.05	0.0836	0.0016	0.002	0.0011	0.0634	0.7095

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (p=0.05).
Fuente: Elaboración propia

Conclusión

Los extractos vegetales de *Azadirachta indica* y *Ocimum basilicum* aumentaron el peso de los frutos comparados con los frutos de plantas no tratadas con los extractos. Por otra parte, las características químicas (pH y º Brix) no fueron afectadas por los extractos. Asimismo, los valores registrados en el contenido de minerales fueron similares, destacando el potasio con 3 a 4 %. La aplicación de los extractos vegetales como bioestimulantes induce el crecimiento y la productividad de las plantas, además, de aumentar la calidad de los frutos de *Solanum lycopersicum* L.

Literatura citada

Ahmad, A., Blasco, B., & Martos, V. (2022). Combating salinity through natural plant extracts based biostimulants: A review. Frontiers in Plant Science. 13(1): 1-19. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.862034

Ajayi, A. M., & Hassan, G. F. (2019). Response of selected tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cultivars to on-field biotic stress. Journal of Agricultural and Crop Research. 1(7): 38-46. https://doi.org/10.33495/JACR_V7I3.19.110

Ali, O., Ramsubhag, A., & Jayaraman, J. (2019). Biostimulatory activities of *Ascophyllum nodosum* extract in tomato and sweet pepper crops in a tropical environment. PLoS One. 14(5): 1-19. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216710

Baltazar, M., Correia, S., Guinan, K. J., Sujeeth, N., Bragança, R. & Gonçalves, B. (2021). Recent advances in the molecular effects of biostimulants in plants: an overview. Biomolecules. 1(11): 1-27. https://doi.org/10.3390/biom11081096

Cuevas C., J. C., & Martinez-Trinidad, T. (2025). Potencial del uso de bioestimulantes en el manejo del arbolado urbano. Revista Mexicana De Ciencias Forestales. 16(91): 4-24. https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i91.1575

Diacono, M., Persiani, A., Montemurro, F., Alfano, V., Geelen, D., Farina, R., Di Bene, C., Renzaglia, M., & Trinchera, A. (2026). On-farm compost and basil residues extract on organic tomato: yield, quality, and mineral fortification responses. Nutrient Cycling in Agroecosystems. 133(10): 1-15. https://doi.org/10.1007/s10705-026-10505-0

ElSayed, A. I., Rafudeen, M. S., Ganie, S. A., Hossain, M. S., & Gomaa, A. M. (2022). Seed priming with cypress leaf extract enhances photosynthesis and antioxidative defense in zucchini seedlings under salt stress. Scientia Horticulturae. 1(293): 110707. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110707

Espinosa-Antón, A. A., Hernández-Herrera, R. M., Pizano-Andrade, J. C., & Salcedo-Perez, E. 2025. Botanical extracts with biostimulant potential for agriculture in Mexico: a review. Biotecnia. 1(27): 1-14. https://doi.org/10.18633/biotecnia.v27.2633

Godlewska, K., Ronga, D., & Michalak, I. (2021). Plant extracts importance in sustainable agriculture. Italian Journal of Agronomy. 16(2): 1-23. https://doi.org/10.4081/ija.2021.1851

Han, M., Kasim, S., Yang, Z., Deng, X., Saidi, N. B., Uddin, M. K., and Shuib, E. M. (2024). Plant extracts as biostimulant agents: A promising strategy for managing environmental stress in sustainable agriculture. Phyton-International Journal of Experimental Botany. 93(9): 2149–2166. https://doi.org/10.32604/phyton.2024.054009

Hernandez-Trejo, A., Rodríguez-Herrera, R., Sáenz-Galindo, A., López-Badillo, C. M., Flores-Gallegos, A. C., Ascacio-Valdez, J. A., Estrada-Drouaillet, B., Osorio-Hernández, E., (2021). Insecticidal capacity of polyphenolic seed compounds from neem (*Azadirachta indica*) on *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) larvae. Journal of Environmental Science and Health, Part B. 56(12): 1023-1030. https://doi.org/10.1080/03601234.2021.2004853

Jasso de Rodríguez, D., Cuevas-Julio, I., Ramírez-Rodríguez, H., Villarreal Quintanilla, J. Á., Hernández-Pérez, A., Díaz Giménez, M. L.V., Peña Ramos, F. M., & Carrillo Lomelí, D. A. 2024. Bioestimulación de extractos de plantas del semidesierto en crecimiento, rendimiento y calidad en pepino. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios. 11(3): 1-12. https://doi.org/10.19136/era.a11n3.4186

Jasso de Rodríguez, D., Rocha-Rivera, M. F., Ramírez-Rodríguez, H., Villarreal-Quintanilla, J.Á., Díaz-Jiménez, M. L.V., Rodríguez G., R., & Carrillo-Lomelí, D. A. (2023). Extractos de plantas como bioestimulantes de crecimiento, rendimiento y calidad de fruto en pimiento morrón. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios. 10(2): 1-12. https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3559

Lucini, L., Rouphael, Y., Cardarelli, M., Bonini, P., Baffi, C., & Colla, G. (2018). A vegetal biopolymer-based biostimulant promoted root growth in melon while triggering brassinosteroids and stress-related compounds. Frontiers in Plant Science. 1(9): 1-11. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00472

Lucini, L., Rouphael, Y., Cardarelli, M., Canaguier, R., Kumar, P. and Colla, G. (2015). The effect of a plant-derived biostimulant on metabolic profiling and crop performance of lettuce grown under saline conditions. Sci. Hortic. 1(182): 124-133. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.11.022

Malar, T. R. J. J., Antonyswamy, J., Vijayaraghavan, P., Kim, Y. O., Al-Ghamdi, A. A., Elshikh, M. S., Hatamleh, A. A., Al-Dosary, M. A., Na, S. N., Kim Hak-Jae. (2020). *In-vitro* phytochemical and pharmacological bio-efficacy studies on *Azadirachta indica* A. Juss and

Melia azedarach Linn for anticancer activity. Saudi Journal of Biological Sciences. 27(2): 682-688. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.11.024

Medrano-Macías, J., Flores-Gallegos, A. C., Nava-Reyna, E., Morales, I., Tortella, G., Solís-Gaona, S. & Benavides-Mendoza, A. (2022). Reactive oxygen, nitrogen, and sulfur species (RONSS) as a metabolic cluster for signaling and biostimulation of plants: an overview. Plants. 1(11): 1-27. https://doi.org/10.3390/plants11233203

Mora P., R. M., Feregrino P., A. A., & Contreras P., M. (2021). Recubrimientos comestibles para extender la vida de anaquel de productos hortofrutícolas. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar. 5(4): 4605-4625. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i4.644
Nahak, G., & Sahu, R. K. (2015). Biopesticidal effect of leaf extract of neem (*Azadirachta indica* A. Juss) on growth parameters and diseases of tomato. Journal of Applied and Natural Science. 7(1): 482-488

Ogidi, O. I., Ayebabogha, M. N., Eze, P. U., Okiemute, O., & Okafor, C. E. (2021). Determination of phytoconstituents and antimicrobial activities of aqueous and methanol extracts of Neem (*Azadirachta Indica*) leaves". International Journal of Pharmacognosy and Chemistry. 2(2): 60-67. https://doi:10.46796/ijpc.vi.155.

Qasem, A., Assaggaf, H., Mrabti, H. N., Minshawi, F., Rajab, B. S., Attar, A. A., Alyamani, R. A., Hamed, M., Mrabti, N. N., Baaboua, A. E., Omari, N. E., Alshahrani, M. M., Al Awadh, A. A., Sheikh, R. A., Ming, L. C., Goh, K.W., & Bouyahya, A. (2023). Determination of chemical composition and investigation of biological activities of *Ocimum basilicum* L. Molecules. 28(614): 1-23. https://doi.org/10.3390/molecules28020614

Teofilović, B., Grujić-Letić, N., Karadžić, M., Kovačević, S., Podunavac-Kuzmanović, S., Gligorić, E., & Gadžurić, S. (2021). Analysis of functional ingredients and composition of *Ocimum basilicum*. South African Journal of Botany. 1(141): 227-234. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.04.035.

Velasco-Ramírez, A. P., Velasco-Ramírez, A., Hernández-Herrera, R. M., Murguia-Lizalde, D. M. and Velasco-Ramírez, S. F. (2022). Extracts of *Verbesina sphaerocephala* and *Verbesina fastigiata* promote potted development of *Fragaria ananassa*. Agroindustrial Science. 12(1): 29-37. https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2022.01.04

Venmathi, M. B. A., Josmeh, D., Tan, J. K., Yong, Y. S., & Shah, M. D. (2021). Efficacy of the aqueous extract of *Azadirachta indica* against the marine parasitic leech and its

phytochemical profiling. Molecules. 1(26): 1-10. https://doi.org/10.3390/molecules26071908

Vijayanand, N., Ramya, S. S., and Rathinavel, S. (2014). Potential of liquid extracts of Sargassum wightii on growth, biochemical and yield parameters of cluster bean plant. Asian Pac. J. Reprod. 1(3): 150-155. https://doi.org/10.1016/S2305-0500(14)60019-1 Du, J. P. (2015). Plant biostimulants: definition, concept, main categories and regulation. Sci. Hortic. 1(196):3-14. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021

Vinković, T., Parađiković, N., Tkalec, M., Teklić, T., & Lončarić, Z. (2012). Effect of biostimulants on nutrient content in some organs and tomato plant. In M. Pospišil (Ed.) Book of abstract of 47th Croatian and 7th International Symposium on Agriculture. Faculty of agronomy, University of Zagreb, pp. 114-115.

Yakhin, O. I., Lubyanov, A. A., Yakhin, I. A. & Brown, P. H. (2017). Biostimulants in Plant Science: A Global Perspective. Frontiers in Plant Science. 1(7): 1-32. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049

Yeshiwas, Y., & Tolessa, K. (2018). Postharvest quality of tomato (*Solanum lycopersicum*) varieties grown under greenhouse and open field conditions. *Int. J. Biotecnol. Mol. Biol. Res.* 1(9): 1-6. https://doi.org/10.5897/IJBMBR2015.0237

Youssef, S. M., El-Serafy, R. S., Ghanem, K. Z., Elhakem, A., & Abdel Aal, A. A. (2022). Foliar spray or soil drench: Microalgae Volume XXVII application impacts on soil microbiology, morphophysiological and biochemical responses, oil and fatty acid profiles of chia plants under alkaline stress. Biology. 11(12): 1-23. https://doi.org/10.3390/biology11121844

Características de color del chile chorro (*Capsicum annum*) en Dolores Hidalgo

Ana Isabel Mireles Arriaga[60], Ana Martha Cruz Ávalos[61], Rocío Alejandra Imperial Cervantes[62], Jesús Hernández Ruíz[63]

Resumen

El chile chorro es una variedad regional de *Capsicum annuum* L. cultivada en Dolores Hidalgo, Guanajuato, con importancia agrícola para la zona, pero con limitada información científica sobre sus atributos físicos de calidad. Esta falta de caracterización limita su identificación, valoración y conservación como recurso fitogenético local. El objetivo fue analizar las características físicas de calidad del fruto mediante la medición instrumental del color y determinar si existían diferencias entre productores. Se evaluaron 24 frutos obtenidos directamente de unidades de producción de Dolores Hidalgo. El color se midió con un colorímetro digital mediante el sistema CIELAB, considerando luminosidad (L*), componente verde-rojo (a*) y componente azul-amarillo (b*). Los datos se analizaron mediante análisis de varianza de una vía y comparación de medias de Tukey-Kramer ($\alpha = 0.05$) en JMP 19.0. No se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre productores para ninguna de las tres variables. La luminosidad promedio varió de 44.550 a 48.167; los valores de a* fueron negativos, de −4.340 a −2.620, lo que confirmó el predominio de tonalidades verdes; y los valores de b* fueron positivos, de 25.342 a 29.590, indicando componentes amarillos en los frutos. En conclusión, las muestras presentaron una coloración externa homogénea entre los productores evaluados. Estos primeros parámetros instrumentales aportan una base técnica para la identificación del chile chorro y para estudios posteriores de conservación y valorización comercial.

Palabras clave: Chile chorro, Guanajuato, color, calidad

[60] División de Ciencias de la Vida, Departamento de Agronomía, Universidad de Guanajuato, Km 9 carretera Irapuato-Silao ap 311 CP, Col. Centro, 36500 Irapuato, Gto. (ana.mireles@ugto.mx)
[61] División de Ciencias de la Vida, Departamento de Agronomía, Universidad de Guanajuato, Km 9 carretera Irapuato-Silao ap 311 CP, Col. Centro, 36500 Irapuato, Gto.(am.cruz@ugto.mx)
[62] División de Ciencias de la Vida, Posgrado en Biociencias, Universidad de Guanajuato, Km 9 carretera Irapuato-Silao ap 311 CP, Col. Centro, 36500 Irapuato, Gto. (ra.imperialcervantes@ugto.mx)
[63] División de Ciencias de la Vida, Posgrado en Biociencias, Universidad de Guanajuato, Km 9 carretera Irapuato-Silao ap 311 CP, Col. Centro, 36500 Irapuato, Gto. (hernandez.jesus@ugto.mx)

Abstract

The chile chorro *Capsicum annuum* L. is cultivated in Dolores Hidalgo, Guanajuato, it had regional agricultural importance but limited scientific information regarding its physical quality attributes. This lack of characterization restricts its identification, appreciation, and conservation as a local plant genetic resource. The objective of this study was to analyze the physical quality characteristics of the fruit through instrumental color measurement and to determine whether differences existed among growers. A total of 24 fruits obtained directly from production units in Dolores Hidalgo were evaluated. Color was measured using a digital colorimeter based on the CIELAB color space, considering lightness (L*), the green-red component (a*), and the blue-yellow component (b*).

Data were analyzed using one-way analysis of variance and Tukey-Kramer mean comparisons ($\alpha = 0.05$) in JMP 19.0. No statistically significant differences among growers were detected for any of the three variables. Mean lightness ranged from 44.550 to 48.167. The a* values were negative, ranging from −4.340 to −2.620, confirming the predominance of green color. The b* values were positive, ranging from 25.342 to 29.590, indicating yellow components in the fruits. In conclusion, the samples exhibited homogeneous external coloration across the growers evaluated. These initial instrumental parameters provide a technical basis for identifying chile chorro and conducting further studies on its conservation and commercial valorization.

Keywords: Chile chorro, Guanajuato, color, quality

Introducción

En México, las especies del género *Capsicum* tiene una gran relevancia cultural, siendo una de las primeras plantas cultivadas en Mesoamérica, especialmente *Capsicum annuum*, domesticado desde tiempos prehispánicos. y por mantener, hasta la actualidad, un papel fundamental en la gastronomía mexicana (Castillo-Téllez et al., 2025).

La amplia variabilidad genética, adaptación a diferentes ambientes y relevancia en la gastronomía. El chile, es una de las hortalizas de mayor importancia y representa una materia prima para las industrias alimentaria, farmacéutica y cosmética (Bosland & Votava, 2012). En el país, se encuentran cultivos y poblaciones silvestres que constituyen

una reserva genética de utilidad para programas de conservación y mejoramiento vegetal (Aguilar-Rincón et al., 2010). Esta diversidad ha propiciado el desarrollo de numerosos tipos regionales, seleccionados por los agricultores durante generaciones, en función de sus condiciones ambientales, prácticas de producción y preferencias de consumo.

Además de su importancia económica, el chile posee un profundo valor cultural, gastronómico y social, al formar parte de la identidad alimentaria de México y de numerosas tradiciones regionales (Moreno-Pérez et al., 2011). Sus frutos aportan sabor, color y pungencia a la dieta, contiene proteínas, carbohidratos, fibras, lípidos y sales minerales como calcio (Ca), fosforo (P) y hierro (Fe), además, se le conocen propiedades antioxidantes, hipocolesterolémicas e inmunosupresoras (Luna-Ortega et al., 2025).

A pesar de su importancia, numerosas variedades locales permanecen escasamente estudiadas desde las perspectivas agronómica, morfológica y genética. La falta de información limita su identificación, aprovechamiento y protección, además de incrementar el riesgo de pérdida de diversidad genética.

La caracterización morfológica constituye una herramienta inicial para documentar los recursos fitogenéticos. Mediante el uso de descriptores cualitativos es posible evaluar características de plantas, hojas, flores, frutos y semillas para generar información que ayude a los programas de conservación, mejoramiento y aprovechamiento comercial (Gálvez Muñoz et al., 2018).

Por consiguiente, la caracterización física del chile chorro resulta necesaria para documentar su variabilidad, fortalecer su identidad y generar criterios que permitan diferenciarlo de otros tipos de chile presentes actualmente en los mercados regionales.

Materiales y métodos

Todo el proceso de medición postcosecha, se llevó a cabo en el laboratorio I+D de la Universidad de Guanajuato, División de Ciencias de la Vida (DICIVA), Campus Irapuato-Salamanca, km 9 carretera Irapuato-Silao ap 311 CP, Col. Centro, 36500 Irapuato, Gto.

Obtención de materia prima

El municipio de Dolores Hidalgo se ubica entre 1,800 y 2,800 m de altitud, condición que influye en su temperatura y régimen de precipitación. La temperatura media se encuentra dentro de un intervalo de 12 a 18 °C, mientras que la precipitación anual varía entre 400 y

900 mm y se concentra principalmente durante el verano. El clima semiseco templado ocupa 60.05 % del territorio, predominan los Phaeozem, que ocupan 57.74 % de la superficie municipal, seguidos por Regosol (17.35 %), Durisol (7.47 %), Chernozem (6.07 %), Leptosol (4.42 %) y Vertisol (3.55 %). También se presentan, en proporciones menores, Luvisol, Kastañozem y Cambisol (INEGI, 2010).

Los frutos de chile chorro utilizados para el desarrollo experimental, fueron obtenidos directamente de vendedores y productores locales ubicados en el municipio de Dolores Hidalgo.

El muestreo se realizó de manera no probabilística por conveniencia, considerando la disponibilidad del producto. Durante la recolección de la materia prima se efectuó una inspección visual de las condiciones físicas y sanitarias del producto, descartando muestras con daños mecánicos, signos de deterioro o contaminación visible. Posteriormente, las muestras fueron transportadas al laboratorio en contendores térmicos, donde se analizaron cinco ejemplares por productor (Figura 1).



Figura 1. Muestra de chile chorro (elaboracion propia)

Los datos de color fueron tomados mediante un colorímetro digital mediante la escala CIE L*a*b*. Posteriormente se calcularon los valores de Cromaticidad = $(a^2+b^2)^{1/2}$ y tonalidad o Hue= $\arctan^{-1}$ (b/a) (Martínez-Damián et al., 2019), que se relacionan con la intensidad y tonalidad del color. Las mediciones se realizaron a temperatura ambiente y bajo condiciones uniformes de iluminación para minimizar variaciones experimentales.

Los datos obtenidos fueron analizados mediante estadística descriptiva, calculando promedio (media) de los datos tomados. Los resultados fueron representados mediante gráficas, mediante una prueba de Tukey-Kramer con a =0.05 mediante el progrma JMP 19.0 versión estudiantil.

Resultados y discusión

El sistema de color CIELAB o CIE Lab* (Figura 2) es una de las herramientas más utilizadas para medir objetivamente el color en diversos productos y materiales vegetales (CIE, 1978). L*, representa la luminosidad o claridad del objeto evaluado en una escala de 0 a 100, donde los valores altos indican colores más claros y los bajos colores más oscuros (Castillo-Téllez et al., 2025).

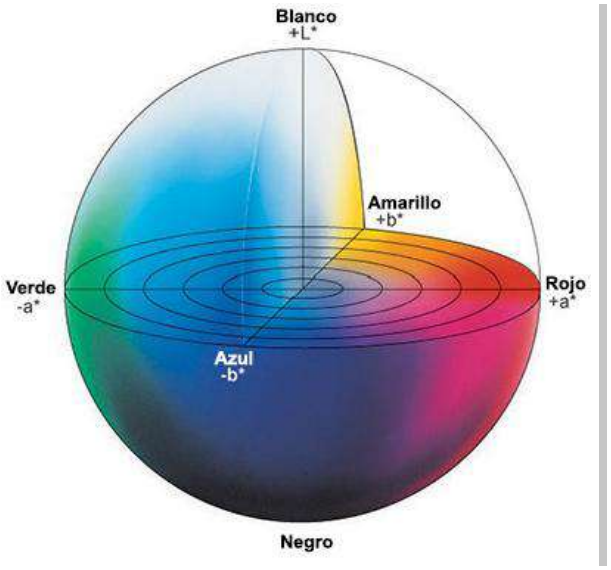


Figura 2. Espacio de color CIE L*a*b*. Fuente: Konica Minolta Sensing (s. f.).

Luminosidad (L)

Los valores de Luminosidad (L) (Figura 3) van de 44.550-48.167, sin diferencias significatias ($p \leq 0.05$). En estudios de *Capsicum annuum*, la medición de color se ha utilizado precisamente como una herramienta para estimar cambios relacionados con pigmentación y madurez, ya que el color del fruto refleja de forma indirecta la acumulación o transformación de carotenoides, o cambios de textura y contenido de agua

en los tejidos vegetales (Villaseñor-Aguilar et al., 2020).

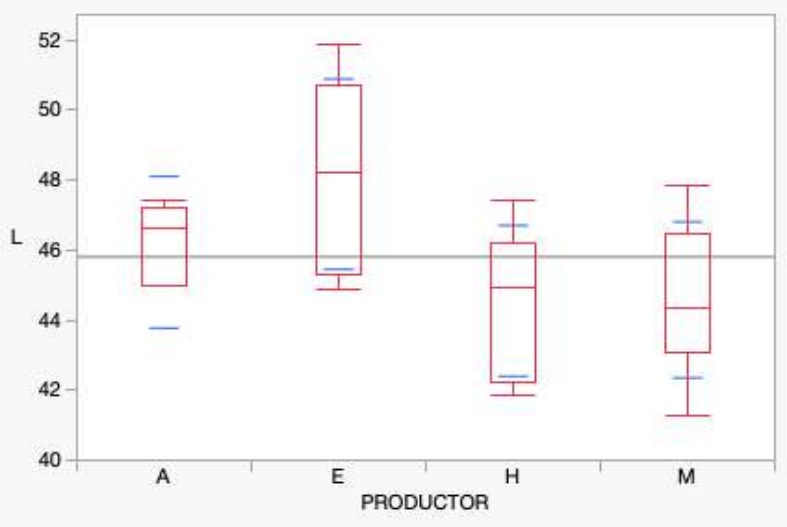


Figura 3. Luminosidad de ejemplares de chile chorro de diferentes productores

El parámetro a* describe la variación entre verde y rojo; los valores negativos indican tonalidades verdes y los valores positivos tonalidades rojas. En frutos de chile, el incremento de a* suele relacionarse con la maduración. En el presente estudio, los valores indican el predominio de tonalidades verdes de -2.620 a -4.340, sin diferencias significativas ($p \leq 0.05$) (Figura 4), los valores negativos coinciden con frutos en estado fresco o comercial verde como serrano, jalapeño, poblado o pimiento morrón, donde todavía existe presencia importante de clorofila (Paredes et al., 2019; Pola et al., 2020).

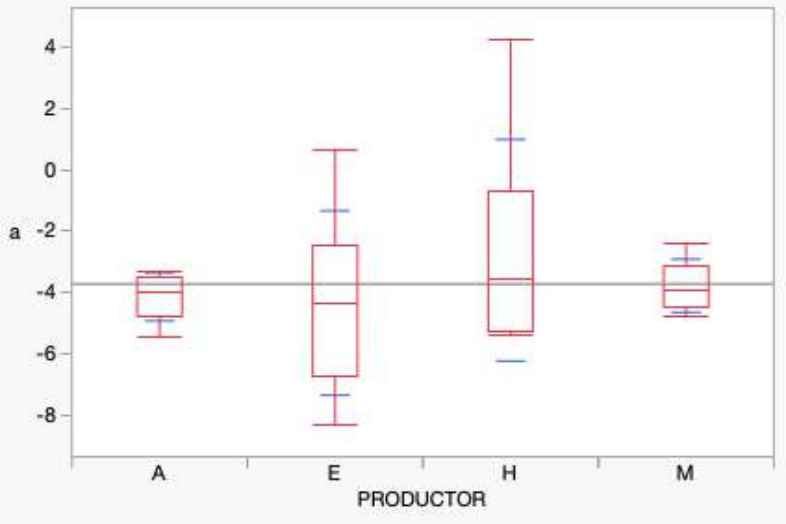


Figura 4. Parámetro a* de ejemplares de chile chorro de diferentes productores

El parámetro b* representa la escala entre azul y amarillo, donde los valores positivos pueden estar relacionados con una mayor presencia de tonalidades amarillas asociadas a pigmentos como carotenoides y xantofilas (Pathare et al., 2013). No se encontraron diferencias significativas entre los productores evaluados ($p \leq 0.05$). Los valores obtenidos van de 25.34 a 29.5 indicando predominancia de tonalidades amarillas en los frutos de chile chorro, similar entre productores (Figura 5).

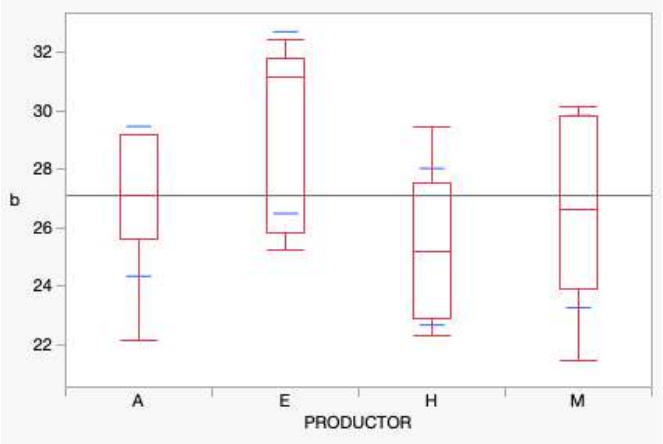


Figura 5. Parámetro b* de ejemplares de chile chorro de diferentes productores

Los valores de Hue entre 95.82° y 98.36° confirman que el color dentro del esapcio CIE Lab se encuentra desplazado ligeramente desde el amarillo hacia el verde. El croma de 26.66 a 30.02 indica una saturación moderada. Los valores promedio de L*a*b*, Hue y Croma pueden ser transformados en escala RGB (116, 110, 64) lo que facilita la visualizacion del color en documentos digitales e impresos.

La medición de color puede emplearse de manera eficiente para evaluar de forma no destructiva la calidad visual y fisiológica de frutos de *Capsicum* como en pimiento morrón (Paredes et al., 2019), chile ornamental (Guo et al., 2021) y pimienta cayena (Casquete et al., 2021).

Conclusiones

La caracterización instrumental demostró que el chile chorro presenta una coloración verde olivo amarillenta homogénea entre productores. Estos parámetros constituyen una referencia objetiva para su identificación, conservación, control de calidad y futura valorización comercial como recurso fitogenético regional.

Literatura citada

Aguilar-Rincón, V. H., Corona-Torres, T., López-López, P., Latournerie-Moreno, L., Ramírez-Meraz, M., Villalón-Mendoza, H., & Aguilar-Castillo, J. A. (2010). Los chiles de México y su distribución. SINAREFI, Colegio de Postgraduados, INIFAP, Instituto Tecnológico de Conkal, Universidad Autónoma de Nuevo León y Universidad Autónoma de Nayarit.

Bosland, P. W., & Votava, E. J. (2012). Peppers: Vegetable and spice *Capsicum*s (2nd ed.). CABI. https://doi.org/10.1079/9781845938253.0000

Casquete, R., Velázquez, R., Hernández, A., Córdoba, M. de G., Aranda, E., Bartolomé, T., & Martín, A. (2021). Evaluation of the quality and shelf-life of cayenne (*Capsicum* spp.). LWT, 145, Article 111338. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111338

Castillo-Téllez, M., Mex-Álvarez, D. C., Llanes-Chiquini, C. M., Hernández-Cruz, L. M., Cano-Carrillo, J., & Castillo-Téllez, B. (2025). Efectos del secado solar sobre el cambio de color en chile pimiento (*Capsicum annuum*). 593 Digital Publisher CEIT, 10(3), 768–777. https://doi.org/10.33386/593dp.2025.3.2800

Commission Internationale de l'Éclairage. (1978). Recommendations on uniform color spaces, color-difference equations, psychometric color terms (Supplement No. 2 to CIE Publication No. 15). Bureau Central de la CIE.

Gálvez Muñoz, Y. A., Martínez Moreno, E., Ramírez Vera, S., Latournerie Moreno, L., Lesher Gordillo, J. M., & Castañón Nájera, G. (2018). Morphological diversity of wild and semi-wild chili populations of Tabasco and the north of Chiapas States, Mexico. Phyton–International Journal of Experimental Botany, 87, 60–67. https://doi.org/10.32604/phyton.2018.87.060

Guo, Y., Bai, J., Duan, X., & Wang, J. (2021). Accumulation characteristics of carotenoids and adaptive fruit color variation in ornamental pepper. Scientia Horticulturae, 275, Article 109699. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109699

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010: Dolores Hidalgo Cuna de la Independencia Nacional, Guanajuato. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/11/11014.pdf

Konica Minolta Sensing. (s. f.). Color spaces. https://sensing.konicaminolta.us/us/learning-center/color-measurement/color-spaces/

Luna-Ortega, J. G., Cervantes-Vázquez, T. J. A., Zúñiga-Gracia, D. A., Preciado-Rangel, P., Márquez-Mendoza, J. I., Lugo-Palacios, A. D., & Gallegos-Robles, M. A. (2025). Bacterias nativas como alternativa sostenible en el rendimiento de chile serrano. Terra Latinoamericana, 43, Article e2156. https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2156

Martínez-Damián, M. T., Cruz-Álvarez, O., Moreno-Pérez, E. del C., & Valle-Guadarrama, S. (2019). Intensidad de color y compuestos bioactivos en colectas de chile guajillo del norte de México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 10(1), 35–49. https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.465

Moreno-Pérez, E. del C., Avendaño-Arrazate, C. H., Mora-Aguilar, R., Cadena-Iñiguez, J., Aguilar-Rincón, V. H., & Aguirre-Medina, J. F. (2011). Diversidad morfológica en colectas de chile guajillo (*Capsicum annuum* L.) del centro-norte de México. Revista Chapingo Serie Horticultura, 17(1), 23–30. https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2011.17.004

Paredes, A., Peche, J., & León, N. (2019). Índice de carotenoides de pimiento morrón (*Capsicum annuum*) basado en la medición de color, utilizando imágenes hiperespectrales y

digitales. Scientia Agropecuaria, 10(4), 531–539. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.04.10

Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A.-J. (2013). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. Food and Bioprocess Technology, 6(1), 36–60. https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9

Pola, W., Sugaya, S., & Photchanachai, S. (2020). Influence of postharvest temperatures on carotenoid biosynthesis and phytochemicals in mature green chili (*Capsicum annuum* L.). Antioxidants, 9(3), Article 203. https://doi.org/10.3390/antiox9030203

Villaseñor-Aguilar, M.-J., Bravo-Sánchez, M.-G., Padilla-Medina, J.-A., Vázquez-Vera, J. L., Guevara-González, R.-G., García-Rodríguez, F.-J., & Barranco-Gutiérrez, A.-I. (2020). A maturity estimation of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) by artificial vision system for quality control. Applied Sciences, 10(15), Article 5097. https://doi.org/10.3390/app10155097

Caracterización morfológica, fisicoquímica y organoléptica de *Agave salmiana* en cuatro comunidades productoras de pulque de Tlaxcala

Escobar-González, D.[64], Serafín-Higuera, E. L.[65], Gallegos-Flores, P. I.[66] y Barrientos-Rivera, G.[67]

Resumen

Agave salmiana es una especie de importancia biológica, cultural y agronómica en el altiplano central de México, particularmente por su aprovechamiento tradicional en la producción de pulque. La caracterización de su variación morfológica y de las propiedades de sus extractos permite generar información sobre las diferencias existentes entre poblaciones locales. El objetivo fue caracterizar y comparar nueve variables morfológicas y cinco características fisicoquímicas y organolépticas de *A. salmiana* en cuatro comunidades productoras de pulque de la microcuenca de Ixtacuixtla, Tlaxcala. Se evaluaron 18 plantas adultas: cinco en Santa Rosa de Lima, cinco en San Marcos Jilotepec, tres en San Agustín y cinco en Alpotzonga de Lira y Ortega. De cada planta se obtuvo un hijuelo, excepto en San Agustín, donde se obtuvieron cinco hijuelos a partir de tres plantas adultas. Se registraron altura de planta, diámetro del tallo y roseta, altura de hojas, características de las espinas y altura del tallo. Los hijuelos fueron secados, pulverizados y macerados en etanol al 70 %, determinándose rendimiento, grados Brix, pH, color y olor. Las variables cuantitativas se analizaron mediante ANOVA de una vía y prueba de Tukey. Se encontraron diferencias significativas en diámetro de roseta ($p=0.0087$), altura de hojas principales ($p=0.0016$), tamaño de espinas marginales ($p=0.0197$), número de espinas marginales ($p=0.0249$) y longitud de espinas terminales ($p=0.0020$). En contraste, rendimiento ($p=0.286$), grados Brix ($p=0.917$) y pH ($p=0.284$) no presentaron diferencias significativas. Los extractos mostraron olor herbal y coloración de verde fuerte a verde pistache. Los resultados evidencian

[64] Licenciatura en Biología, Facultad de Agrobiología, Universidad Autónoma de Tlaxcala (advas2425@gmail.com)
[65] Laboratorio de Recursos Naturales. Km 10.5, Carretera San Martín Texmelucan S/N, San Felipe Ixtacuixtla, C.P. 90120, Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, Tlaxcala, México (emirlenin.1015@gmail.com)
[66] Laboratorio de Biología y Medio Ambiente, Licenciatura en Biología, Unidad Académica de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Zacatecas. Av. Preparatoria S/N, Col. Agronómica, Campus II, C.P. 98600, Zacatecas, Zacatecas, México (ivonne_gf@uaz.edu.mx)
[67] Laboratorio de Recursos Naturales. Km 10.5, Carretera San Martín Texmelucan S/N, San Felipe Ixtacuixtla, C.P. 90120, Ixtacuixtla de Mariano Matamoros, Tlaxcala, México (gbarrientosr@uatx.mx)

diferenciación morfológica entre comunidades, mientras que las características evaluadas de los extractos presentaron mayor homogeneidad.

Palabras clave: agaves pulqueros; extractos etanólicos; sólidos solubles; características sensoriales; altiplano mexicano.

Abstract

Agave salmiana is a species of biological, cultural, and agronomic importance in the central Mexican highlands, particularly because of its traditional use in pulque production. Characterizing its morphological variation and extract properties provides information on differences among local populations. The objective was to characterize and compare nine morphological variables and five physicochemical and organoleptic characteristics of *A. salmiana* in four pulque-producing communities of the Ixtacuixtla micro-watershed, Tlaxcala. Eighteen adult plants were evaluated: five in Santa Rosa de Lima, five in San Marcos Jilotepec, three in San Agustín, and five in Alpotzonga de Lira y Ortega. One offset was collected from each plant, except in San Agustín, where five offsets were obtained from three adult plants. Plant height, stem and rosette diameter, leaf height, spine characteristics, and stem height were recorded. Offsets were dried, ground, and macerated in 70% ethanol, and extraction yield, soluble solids (°Brix), pH, color, and odor were determined. Quantitative variables were analyzed using one-way ANOVA and Tukey's test. Significant differences were found in rosette diameter (p=0.0087), main leaf height (p=0.0016), marginal spine size (p=0.0197), number of marginal spines (p=0.0249), and terminal spine length (p=0.0020). In contrast, extraction yield (p=0.286), °Brix (p=0.917), and pH (p=0.284) showed no significant differences. The extracts exhibited a herbal odor and coloration ranging from strong green to pistachio green. These results indicate morphological differentiation among communities, whereas the evaluated extract characteristics showed greater homogeneity.

Keywords: pulque agaves; ethanolic extracts; soluble solids; sensory characteristics; Mexican Highlands.

Introducción

El género *Agave* presenta una amplia importancia ecológica, cultural y económica en México. Entre las especies aprovechadas tradicionalmente destaca *Agave salmiana*, especie ampliamente asociada con la producción de aguamiel y pulque en el altiplano mexicano. En Tlaxcala, diferentes formas tradicionales de *A. salmiana* forman parte de sistemas de

producción en los que los productores reconocen y seleccionan las plantas de acuerdo con características morfológicas y de manejo.

La variación morfológica constituye una herramienta importante para la caracterización de poblaciones y formas tradicionales de los agaves pulqueros. Trejo et al. (2020) analizaron la diversidad morfológica de agaves utilizados para la producción de pulque en Tlaxcala y encontraron que los caracteres vegetativos permiten reconocer patrones de diferenciación entre grupos de *Agave*, aunque también observaron una considerable similitud morfológica entre algunas formas tradicionales de *A. salmiana*. Los autores señalaron que la plasticidad de los caracteres morfológicos y el flujo génico pueden contribuir a explicar parte de esta variación.

De manera complementaria, Muñoz-Camacho et al. (2023) estudiaron la diversidad de agaves pulqueros en San Pedro Tlalcuapan, Tlaxcala, mediante caracteres morfológicos y análisis de componentes principales. Encontraron que características relacionadas con el tamaño de la roseta, forma y número de hojas y forma de los dientes fueron importantes para distinguir grupos morfológicos.

Además de la morfología, las características fisicoquímicas de los tejidos y extractos de *A. salmiana* pueden aportar información complementaria sobre la composición de la planta. Estudios realizados en diferentes regiones han documentado diferencias fisicoquímicas entre subspecies de *A. salmiana*, asociadas con condiciones ambientales y características de los sitios de crecimiento. Campos-Herrera et al. (2025), por ejemplo, encontraron diferencias en características fisicoquímicas de hojas de dos subspecies de *A. salmiana* procedentes de regiones con diferentes condiciones ambientales.

En el caso de productos líquidos derivados del agave, variables como los sólidos solubles y el pH son utilizadas para caracterizar la savia y el aguamiel. Sin embargo, estos valores dependen del tejido analizado, estado de madurez, manejo y procedimiento de extracción. En aguamiel de *A. salmiana* se han reportado valores de sólidos solubles y pH considerablemente diferentes de los obtenidos en otros tipos de extractos, por lo que es necesario considerar el procedimiento de obtención al realizar comparaciones.

En este contexto, la microcuenca de Ixtacuixtla constituye una zona de interés para el estudio de *A. salmiana*, debido a la presencia de comunidades con actividad pulquera. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue caracterizar y comparar las características morfológicas y las propiedades fisicoquímicas y organolépticas de *Agave salmiana* en cuatro comunidades productoras de pulque de la microcuenca de Ixtacuixtla, Tlaxcala.

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en la microcuenca de Ixtacuixtla, localizada en la región centro-oeste del estado de Tlaxcala, México, a una altitud superior a 2,300 m s. n. m. El área presenta una tradición de aprovechamiento de *Agave salmiana* para la producción de aguamiel y pulque. Se seleccionaron cuatro localidades con actividad actual de producción de pulque, considerando este criterio como condición para su inclusión en el estudio.

Las localidades fueron Santa Rosa de Lima, San Marcos Jilotepec, San Agustín y Alpotzonga de Lira y Ortega.

Diseño de muestreo

La selección de las plantas se realizó considerando ejemplares adultos próximos a la etapa de aprovechamiento para producción de pulque. Debido a la disponibilidad de plantas maduras, el número de individuos adultos no fue idéntico en todas las comunidades.

Se muestrearon 18 plantas adultas en total: cinco en Santa Rosa de Lima, cinco en San Marcos Jilotepec, tres en San Agustín y cinco en Alpotzonga de Lira y Ortega.

En Santa Rosa de Lima, San Marcos Jilotepec y Alpotzonga de Lira y Ortega se seleccionaron cinco plantas adultas por localidad. En San Agustín únicamente se localizaron tres plantas adultas con las características requeridas; de dos de ellas se obtuvieron dos hijuelos y de la tercera un hijuelo, obteniendo así cinco hijuelos para esta localidad.

En total se obtuvieron 20 hijuelos, uno por cada unidad de muestreo vegetal destinada al análisis fisicoquímico, considerando los cinco hijuelos de San Agustín como procedentes de las tres plantas adultas disponibles.

Cuadro 1. Coordenadas geográficas de las plantas adultas de *Agave salmiana* muestreadas.

COMUNIDAD	PLANTA	LATITUD N	LONGITUD O
SANTA ROSA DE LIMA	1	19°23′12.0″	98°21′37.90″
SANTA ROSA DE LIMA	2	19°23′11.1″	98°21′38.6″
SANTA ROSA DE LIMA	3	19°23′21.8″	98°21′26.9″
SANTA ROSA DE LIMA	4	19°23′21.4″	98°21′24.7″

SANTA ROSA DE LIMA	5	19°23′22.4″	98°21′27.2″
SAN MARCOS JILOTEPEC	1	19°22′45.3″	98°22′28.9″
SAN MARCOS JILOTEPEC	2	19°22′46.6″	98°22′26.5″
SAN MARCOS JILOTEPEC	3	19°22′48.8″	98°22′25.4″
SAN MARCOS JILOTEPEC	4	19°22′46.5″	98°22′34.6″
SAN MARCOS JILOTEPEC	5	19°22′45.3″	98°22′34.7″
SAN AGUSTÍN	1	19°27′53.2″	98°29′37.2″
SAN AGUSTÍN	2	19°27′53.69″	98°29′37.17″
SAN AGUSTÍN	3	19°27′53.60″	98°29′37.22″
ALPOTZONGA DE LIRA Y ORTEGA	1	19°22′39.5″	98°25′54.3″
ALPOTZONGA DE LIRA Y ORTEGA	2	19°22′40.6″	98°25′54.5″
ALPOTZONGA DE LIRA Y ORTEGA	3	19°22′40.4″	98°25′53.7″
ALPOTZONGA DE LIRA Y ORTEGA	4	19°22′39.9″	98°25′54.4″
ALPOTZONGA DE LIRA Y ORTEGA	5	19°22′39.9″	98°25′55.6″

Fuente: Elaboración propia a partir del registro de campo.

Caracterización morfológica

La caracterización morfológica se realizó directamente en campo. En cada planta adulta se registraron nueve variables: altura de la planta, diámetro del tallo, diámetro de la roseta, altura de hojas principales, tamaño de espinas marginales, número de espinas marginales, separación de espinas marginales, longitud de espinas terminales y altura del tallo.

La altura de la planta se determinó desde la base hasta el ápice de la roseta. El diámetro de la roseta y el diámetro del tallo se obtuvieron considerando la mayor amplitud de cada estructura. Para la caracterización de las hojas se seleccionaron hojas centrales y se registró su longitud. El número de espinas marginales se determinó mediante conteo, mientras que la longitud de las espinas marginales y terminales se obtuvo mediante vernier digital.

La caracterización morfológica se realizó tomando como referencia descriptores utilizados para la caracterización de agaves. La selección de caracteres relacionados con roseta, hojas y espinas es consistente con estudios previos de diversidad morfológica de agaves pulqueros en Tlaxcala.

Obtención del material vegetal y preparación de los extractos

Para la caracterización fisicoquímica y organoléptica se utilizaron hijuelos de *Agave salmiana* obtenidos de las plantas adultas seleccionadas en cada comunidad. De cada hijuelo

se seleccionaron hojas en buenas condiciones, evitando aquellas que presentaran daños visibles. Las hojas fueron sometidas a un proceso de secado a 60 °C durante tres días; posteriormente, el material vegetal seco fue pulverizado y sometido a maceración durante tres semanas con etanol al 70 %. A partir de estos extractos se realizaron las determinaciones fisicoquímicas y organolépticas.

Caracterización fisicoquímica y organoléptica

A partir de los extractos obtenidos se determinaron cinco características:

- rendimiento de maceración;
- grados Brix;
- pH;
- color;
- olor.

Los análisis fisicoquímicos y organolépticos se realizaron directamente sobre los extractos obtenidos de las hojas de los hijuelos de *A. salmiana*. El rendimiento correspondió al material obtenido después del proceso de maceración; los grados Brix se determinaron mediante refractómetro óptico manual y el pH mediante potenciómetro. El color se evaluó mediante carta Munsell y el olor mediante evaluación organoléptica.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos de las variables morfológicas y fisicoquímicas cuantitativas fueron organizados en una base de datos y posteriormente procesados mediante RStudio IDE, versión 2026.08.0. Se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA), considerando la comunidad de procedencia como factor de comparación. Cuando se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre las medias, se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey. Se estableció un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$.

Previamente al análisis, se verificaron los supuestos requeridos para la aplicación del ANOVA. Para las variables que no cumplieron con los supuestos del análisis paramétrico, se consideró la aplicación de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. Los resultados fueron expresados mediante medias y medidas de dispersión correspondientes.

Resultados y discusión

Variación morfológica

Se identificaron diferencias significativas entre comunidades en cinco de las nueve variables morfológicas evaluadas. El diámetro de la roseta presentó diferencias significativas (p=0.0087), con valores medios de 4.342 m en Santa Rosa de Lima, 2.752 m en San Agustín, 3.650 m en San Marcos Jilotepec y 5.090 m en Alpotzonga de Lira y Ortega. El promedio general fue de 3.958 m.

La altura de las hojas principales también presentó diferencias significativas (p=0.0016), con valores de 2.154, 1.600, 2.092 y 2.452 m para Santa Rosa de Lima, San Agustín, San Marcos Jilotepec y Alpotzonga de Lira y Ortega, respectivamente.

Asimismo, se observaron diferencias significativas en el tamaño de las espinas marginales (p=0.0197), número de espinas marginales (p=0.0249) y longitud de las espinas terminales (p=0.0020). En contraste, la altura de la planta, el diámetro del tallo, la separación de las espinas marginales y la altura del tallo no mostraron diferencias significativas entre comunidades.

VARIABLE	SANTA ROSA	SAN AGUSTÍN	SAN MARCOS JILOTEPEC	ALPOTZONGA DE LIRA Y ORTEGA	PROMEDIO	P
ALTURA DE PLANTA (M)	2.756 ± 0.215	2.700 ± 0.215	2.400 ± 0.215	2.780 ± 0.215	2.659	0.0791
DIÁMETRO DEL TALLO (CM)	20.164 ± 16.46	70.600 ± 16.46	55.926 ± 16.46	34.582 ± 16.46	45.318	0.1800
DIÁMETRO DE ROSETA (M)	4.342 ± 0.425	2.752 ± 0.425	3.650 ± 0.425	5.090 ± 0.425	3.958	0.0087
ALTURA DE HOJAS PRINCIPALES (M)	2.154 ± 0.123	1.600 ± 0.123	2.092 ± 0.123	2.452 ± 0.123	2.074	0.0016
TAMAÑO DE ESPINAS MARGINALES (CM)	0.314 ± 0.064	0.596 ± 0.064	0.336 ± 0.064	0.326 ± 0.064	0.393	0.0197
NÚMERO DE ESPINAS MARGINALES	78.5 ± 7.701	44.4 ± 7.701	74.4 ± 7.701	72.0 ± 7.701	67.4	0.0249
SEPARACIÓN DE ESPINAS MARGINALES (CM)	2.940 ± 0.384	3.138 ± 0.384	2.740 ± 0.384	2.342 ± 0.384	2.79	0.5210
LONGITUD DE ESPINAS TERMINALES (CM)	3.77 ± 0.654	7.27 ± 0.654	3.36 ± 0.654	5.11 ± 0.654	4.877	0.0020

ALTURA DEL TALLO (CM)	77.0 ± 12.001	46.0 ± 12.001	69.2 ± 12.001	50.0 ± 12.001	60.55	0.2410

Fuente: Elaboración propia con datos del estudio.

Los resultados coinciden con la importancia de los caracteres vegetativos para la diferenciación morfológica de los agaves pulqueros. Trejo et al. (2020), trabajando con *A. salmiana* y *A. mapisaga* en diferentes localidades de Tlaxcala, encontraron que caracteres relacionados con hojas, dientes y espinas contribuían a la diferenciación morfológica de los grupos estudiados. Sin embargo, también observaron que varias formas tradicionales de *A. salmiana* mostraron una elevada similitud en sus caracteres vegetativos, lo que fue relacionado con plasticidad morfológica y flujo génico.

En otro estudio realizado en San Pedro Tlalcuapan, Tlaxcala, Muñoz-Camacho et al. (2023) encontraron que el tamaño de la roseta, características de las hojas y forma de los dientes fueron variables importantes para distinguir grupos morfológicos de agaves pulqueros.

Nuestros resultados son consistentes con estos antecedentes, ya que las variables que mostraron diferencias significativas incluyen precisamente características de la roseta, hojas y espinas. La coincidencia resulta particularmente relevante porque los estudios se realizaron en poblaciones de agaves asociados con sistemas tradicionales de producción de pulque en Tlaxcala.

Características fisicoquímicas de los extractos

El rendimiento de maceración presentó valores de 0.806 en Santa Rosa de Lima, 0.726 en San Agustín, 0.730 en San Marcos Jilotepec y 0.752 en Alpotzonga de Lira y Ortega. El promedio general fue de 0.753 y no se detectaron diferencias significativas entre comunidades (p=0.286).

Los grados Brix presentaron un promedio de 0.21 en las cuatro comunidades y no mostraron diferencias significativas (p=0.917).

El pH presentó valores medios de 7.54 en Santa Rosa de Lima, 7.60 en San Agustín, 6.59 en San Marcos Jilotepec y 7.24 en Alpotzonga de Lira y Ortega. El promedio general fue 7.24 y las diferencias no fueron estadísticamente significativas (p=0.284).

Cuadro 3. Características fisicoquímicas de los extractos de *Agave salmiana*.

VARIABLE	SANTA ROSA	SAN AGUSTÍN	SAN MARCOS JILOTEPEC	ALPOTZONGA DE LIRA Y ORTEGA	PROMEDIO	P
RENDIMIENTO DE MACERACIÓN	0.806 ± 0.0314	0.726 ± 0.0314	0.730 ± 0.0314	0.752 ± 0.0314	0.753	0.286
GRADOS BRIX	0.21 ± 0.002	0.21 ± 0.002	0.21 ± 0.002	0.21 ± 0.002	0.21	0.917
PH	7.54 ± 0.395	7.60 ± 0.395	6.59 ± 0.395	7.24 ± 0.395	7.24	0.284

Fuente: Elaboración propia con datos del estudio

El rendimiento de extracción, los grados Brix y el pH no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las comunidades evaluadas. Los grados Brix presentaron un promedio de 0.21 °Brix. Debido a que estas determinaciones se realizaron a partir de extractos etanólicos obtenidos de hojas de hijuelos de *A. salmiana*, los valores no son directamente comparables con aquellos reportados para aguamiel, cuya composición corresponde a una matriz vegetal diferente. En este sentido, Campos-Herrera et al. (2025) evaluaron características fisicoquímicas de hojas de *A. salmiana* procedentes de diferentes regiones y encontraron variación asociada con las condiciones de procedencia de las plantas. La ausencia de diferencias significativas observada en el presente estudio podría estar relacionada con que las plantas fueron recolectadas dentro de una misma microcuenca y bajo condiciones regionales relativamente similares, aunque esta interpretación requiere ser corroborada mediante el análisis conjunto de las características ambientales y edáficas de los sitios.

Características organolépticas

El análisis organoléptico mostró que los extractos presentaron un olor herbal y una coloración comprendida entre verde fuerte y verde pistache, registrada mediante la carta Munsell como 5G 5/6–2.5Y 7/4.

Cuadro 4. Características organolépticas de los extractos de *Agave salmiana*.

Característica	Resultado
Olor	Herbal
Color	Verde fuerte a verde pistache
Registro Munsell	5G 5/6 – 2.5Y 7/4

Fuente: Elaboración propia con datos del estudio

Estas características fueron utilizadas como descriptores cualitativos y, por ello, no fueron sometidas a ANOVA. Su inclusión permite complementar la información cuantitativa obtenida mediante pH, grados Brix y rendimiento.

La caracterización sensorial también es relevante dentro del contexto de aprovechamiento tradicional del agave, aunque debe diferenciarse entre el extracto experimental utilizado en este estudio y productos tradicionales como aguamiel o pulque. Estudios sobre savia de *A. salmiana* han evaluado conjuntamente propiedades fisicoquímicas y sensoriales, mostrando que el procedimiento de extracción y conservación puede modificar las características del producto.

Conclusiones

Las plantas de *Agave salmiana* evaluadas en cuatro comunidades productoras de pulque de la microcuenca de Ixtacuixtla presentaron variación morfológica significativa. De las nueve variables analizadas, cinco mostraron diferencias estadísticas entre comunidades: diámetro de la roseta, altura de hojas principales, tamaño de espinas marginales, número de espinas marginales y longitud de espinas terminales.

Las características morfológicas que presentaron diferencias coinciden con descriptores que han demostrado utilidad para reconocer diversidad morfológica en agaves pulqueros de Tlaxcala, particularmente caracteres asociados con roseta, hojas y estructuras espinosas.

En contraste, el rendimiento de maceración, los grados Brix y el pH del extracto no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las comunidades estudiadas. Los extractos presentaron características organolépticas similares, con olor herbal y coloración de verde fuerte a verde pistache.

En conjunto, los resultados muestran que, bajo las condiciones de muestreo y extracción empleadas, la diferenciación entre comunidades fue más evidente en las características morfológicas que en las variables fisicoquímicas evaluadas en los extractos. Estos resultados aportan información para la caracterización de poblaciones locales de *A. salmiana* asociadas con sistemas tradicionales de producción de pulque en Tlaxcala.

Literatura citada

Campos-Herrera, O., González-Cruz, L., Silva-Martínez, G. A., Flores-Martínez, N. L., Ortíz-Basurto, R. I., & Bernardino-Nicanor, A. (2025). Physicochemical differences in the leaves of the two *Agave salmiana* subspecies grown in different regions. *Agriculture, 15*(2), 134. https://doi.org/10.3390/agriculture15020134

Muñoz-Camacho, L. L., Bello-Cervantes, E., Romano-Grande, E., & Trejo-Hernández, L. (2023). Diversity and traditional knowledge of pulque agave landraces in the community of San Pedro Tlalcuapan, Tlaxcala, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad, 94*, e944979. https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2023.94.4979

Trejo, L., Reyes, M., Cortés-Toto, D., Romano-Grande, E., & Muñoz-Camacho, L. L. (2020). Morphological diversity and genetic relationships in pulque production agaves in Tlaxcala, Mexico, by means of unsupervised learning and gene sequencing analysis. *Frontiers in Plant Science, 11*, 524812. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.524812

Extracción de quitosano a partir de peces diablo mediante dos técnicas

Rafael Juarez López[68], César Mateo Flores Ortíz[69], Adolfo Amador Mendoza, Martha Elena Aguilera Morales

Resumen

El quitosano es un carbohidrato con propiedades fisicoquímicas de interés, como biodegradabilidad, biocompatibilidad, baja toxicidad, actividad antimicrobiana, capacidad para formar películas, potencial como promotor del crecimiento y respuesta inmunitaria en diversos animales, incluidos los peces. Estas características confieren numerosas aplicaciones biotecnológicas e industriales en el sector agropecuario. El pez diablo es una especie exótica invasora que representa un problema ambiental y económico debido a su rápida reproducción, amplia distribución y desplazamiento de especies nativas. Sus placas tegumentarias, de naturaleza quitinosa, constituyen una fuente potencial de quitosano y una alternativa para su aprovechamiento como materia prima de valor agregado. El objetivo de este estudio fue extraer quitosano de placas dérmicas de pez diablo mediante el método químico tradicional (MQT) y extracción asistida por ultrasonido (EAU), comparando rendimiento, consumo de reactivos, tiempo de procesamiento y características fisicoquímicas. Ambos métodos incluyeron desproteinización, desmineralización y desacetilación con diferentes concentraciones de NaOH y HCl. La EAU, redujo los tiempos de tratamiento respecto al MQT. Su rendimiento en quitosano fue significativamente mayor EAU (31.35 ± 0.71 g/100 g) así también tuvo menor consumo de agua y tiempo de procesamiento. Aunque el quitosano por el MTQ tuvo menos residuos proteicos (91.96 %), y minerales (98.48 %) no tuvo mayor porcentaje de desacetilación, ya que se trata de parámetros independientes; el primero mide pureza física, el segundo mide la modificación química. La coloración oscura poco atractiva puede mejorarse con técnicas específicas. El método EAU es más eficiente ya que mejora rendimiento, reduce la cantidad de reactivos y tiempo.

Palabras clave: Quitosano, Pez diablo, Extracción

[68] Universidad del Papaloapan campus Loma Bonita, Instituto de Agroingeniería. Av. Ferrocarril s/n, CD. Universitaria, Loma Bonita, Oaxaca, México. C.P. 68300, juarezlopezrafael@gmail.com, aamador@unpa.edu.mx, aguilena02@gmail.com

[69] Universidad Nacional Autónoma de México, Laboratorios Nacionales. Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Avenida de los Barrios número 1, colonia los reyes Iztacala, Tlalnepantla de Baz, Estado de México. C.P. 54090, cmflores@unam.mx

Abstract

Chitosan is a carbohydrate with physicochemical properties of interest, including biodegradability, biocompatibility, low toxicity, antimicrobial activity, film-forming capacity, and potential as a growth and immune response promoter in various animals, including fish. These characteristics provide numerous biotechnological and industrial applications in the agricultural sector. The devil fish is an invasive exotic species that represents an environmental and economic problem due to its rapid reproduction, wide distribution, and displacement of native species. Its chitinous dermal plates constitute a potential source of chitosan and an alternative for their utilization as a value-added raw material. The objective of this study was to extract chitosan from devil fish dermal plates using the traditional chemical method (TCM) and ultrasound-assisted extraction (UAE), comparing yield, reagent consumption, processing time, and physicochemical characteristics. Both methods included deproteinization, demineralization, and deacetylation using different concentrations of NaOH and HCl. UAE reduced treatment times compared with TCM. Its chitosan yield was significantly higher (31.35 ± 0.71 g/100 g), and it also required less water and processing time. Although chitosan obtained by TCM had lower residual protein (91.96%) and mineral content (98.48%), it did not exhibit a higher degree of deacetylation, since these are independent parameters: the former reflects physical purity, whereas the latter reflects chemical modification. The unattractive dark coloration may be improved through specific treatments. Therefore, UAE is a more efficient method because it improves chitosan yield while reducing reagent consumption and processing time.

Keywords: Chitosan, Devil fish, Extraction

Introducción

El quitosano es un carbohidrato constituido mayormente por N-acetil-D-glucosamina (unidad acetilada) y D-glucosamina (unidad desacetilada) unidas por enlaces β-(1-4) (Niu y Hu, 2024), que proviene de la quitina (Niu y Hu, 2024; Kozma *et al*., 2022), es el segundo biopolímero más abundante en la naturaleza después de la celulosa (Niu y Hu, 2024) por lo que constituye un importante recurso renovable (Bertrand *et al*., 2024). El quitosano es un biopolímero catiónico natural cuenta con propiedades únicas y seguras, no es tóxico, es biodegradable, biocompatible, antimicrobiano de amplio espectro, tiene capacidad de formación de películas comestibles, además de ser promotor de crecimiento y de la inmunidad en diversos animales incluyendo peces, por lo que tiene una amplia diversidad de aplicaciones biotecnológicas e industriales en el sector agropecuario (Boarin y Graciano, 2016; Aranaz *et al*., 2021; El-Naggar *et al*., 2021; Mei *et al*., 2024). Las propiedades

fisicoquímicas tales como el grado de desacetilación, peso molecular, el porcentaje de cenizas, contenido de humedad, el contenido de metales pesados y el porcentaje de proteínas son parámetros fundamentales para su aplicación en diversas áreas como la alimentación, medicina, agricultura, cosmética, farmacia, tratamiento de aguas residuales, entre otras (Macea, *et al*., 2015; Aranaz *et al*., 2021; Weißpflog *et al*., 2021; Gamage *et al*., 2023).

Las principales fuentes de extracción de quitina son los exoesqueletos que protegen como armadura a diversos animales, como insectos, crustáceos, moluscos, escamas de peces como la trucha, la tilapia, carpa, entre otras especies (Tello, 2017; Kou *et al*., 2021). Algunas investigaciones se han realizado para el aprovechamiento de las escamas con el fin de obtener biopolímeros como son la quitina y el quitosano (Soud *et al*., 2024). Los exoesqueletos de camarón contienen una alta concentración de quitina, de la cual se puede obtener quitosano mediante un proceso químico de N-desacetilación (Pakizeh *et al*., 2021; Hamed *et al*., 2022). En estudios recientes se ha obtenido quitosano de peces diablo

El pez diablo es considerado como especie invasora, ya que representa un problema ambiental y económico al invadir cuerpos de agua del país y también a nivel mundial (CONANP, 2020; Monge, 2024). Se reporta introducido por escape o liberación de instituciones con fines de investigación, escape accidental, acuarios comerciales y personas comunes con acuarios, dependiendo del cuerpo de agua donde se capture la especie puede contener plomo, generando incertidumbre para su aprovechamiento como alimento (Alvarado-Arcia *et al*., 2024; Amir *et al*., 2020). Por otra parte, este pez puede ser portador de plagas propias o de otros cuerpos de agua. Así también representa un riesgo al turismo porque se camuflajean con el piso y accidentalmente los llegan a pisar en sus espinas de la aleta dorsal (Mendoza, *et al*., 2007).

Esta especie presenta una reproducción precoz y una alta tasa reproductiva, es una especie exótica invasora de los cuerpos de agua dulceacuícolas que causa daños ambientales al consumir a su paso la biota acuática original (consumiendo huevos, algas y materiales orgánicos del sustrato de fondo) y desplazando a las especies lugareñas (Stolbunov *et al*., 2021; Wei *et al*., 2022; Quintana *et al*., 2023). En base a todo lo anterior, el pez diablo representa una opción atractiva de explotación acuícola para la obtención del quitosano debido a la coraza tegumentaria formada por placas quitinosas (óseas) similares a escamas que cubren su cuerpo a modo de protección (Amador-Mendoza *et al*., 2025). Además, presenta alta disponibilidad en diversos cuerpos de agua, así como una alternativa de reducir las poblaciones y convertirlo en un producto con valor agregado y con utilización (Molina, 2018; Ruiz-Aguilar *et al*., 2023; Amador-Mendoza *et al*., 2025).

Estudios recientes han demostrado que las condiciones y el método de procesamiento pueden modificar significativamente propiedades del quitosano como el rendimiento, peso molecular, estructura y grado de desacetilación, por lo que la selección de la técnica de extracción constituye un aspecto relevante del proceso de obtención (Mohammadi *et al*., 2023). Principalmente el quitosano ha sido extraído por el método químico tradicional, sin embargo, requiere diversas etapas de tratamiento y el empleo de gran cantidad de reactivos químicos para la transformación de la materia prima, condiciones que pueden influir en el consumo de recursos y en las características fisicoquímicas del producto obtenido. Ante esta situación, la extracción asistida por ultrasonicación representa una alternativa tecnológica para intensificar los procesos de extracción, debido a que el ultrasonido puede favorecer la eficiencia de extracción y utilizarse como tratamiento o pretratamiento en matrices de origen biológico. Este método se basa en el efecto de la difusión de las ondas ultrasónicas en un medio líquido, y sus frecuencias se encuentran por encima del rango audible (> 20 kHz) y por debajo de las frecuencias de microondas (hasta 10 MHz). La ultrasonicación es un proceso eficiente para reducir los tiempos de reacción y la despolimerización del material si se controla óptimamente la temperatura, frecuencia, intensidad y concentración del polímero, mejorando la calidad, el rendimiento y sus características fisicoquímicas (Martín *et al*., 2017). Matouri *et al*. (2024); Vallejo-Domínguez *et al*. (2021); Ke *et al*., 2021; Kozma *et al*., 2022) refieren que la aplicación de ultrasonicación en residuos de cáscara de camarón, incrementan la desproteinización hasta 80.93 % mejorando la calidad del quitosano. Sin embargo, la eficiencia de la ultrasonicación depende de las condiciones en que se use y de la materia prima empleada ya que varía en base a la concentración de reactivos y la materia prima a utilizar, debido a que como lo refieren los autores anteriores, diferentes fuentes de quitosano reaccionan diferente a las condiciones y concentraciones de extracción.

La hipótesis a probar en este trabajo fue comprobar que la EAU mejora las variables de rendimiento, cantidad de consumo de reactivos, tiempo y características fisicoquímicas del quitosano (espectrofotometría infrarroja con diagrama de Fourier (FTIR), % de mineralización y desproteinización, color). Por lo que el objetivo la investigación fue extraer quitosano del pez diablo mediante el Método Químico Tradicional (MQT) y el Método de Extracción Asistida por Ultrasonido (EAU) y determinar su eficiencia en cuanto a cantidad de reactivos, tiempo de producción y características físico-químicas (espectrofotometría infrarroja con diagrama de Fourier (FTIR), % de mineralización y desproteinización, color).

Materiales y método

Se capturaron peces diablo de diferentes tallas y pesos en el rio paso de las yeguas, ubicada en la parte norte del Municipio de Loma Bonita, Oaxaca, y se trasladaron para ser procesados al Laboratorio de Sanidad Animal y el laboratorio Químico Biológico de la Universidad del Papaloapan campus Loma Bonita, Oaxaca.

Los peces diablo fueron lavados con agua corriente y cepillo para remover los sustratos y basura adheridas en la superficie, después fueron desollados obteniendo sus corazas tegumentarias, las cuales, se secaron en un horno de convección marca Ecoshel durante 12 h y luego se trituraron en una licuadora industrial marca Tor-rey hasta su pulverización. Posteriormente se pasaron por tamiz de 42 mm para obtener una harina de peces diablo (HPD).

El proceso de extracción de quitosano en ambas técnicas incluyó el siguiente proceso: la extracción de la proteína (desproteinización), la eliminación de impurezas inorgánicas (desmineralización) y la eliminación de grupos acetilo (desacetilación).

Método químico tradicional (MQT). En la desproteinización se utilizó hidróxido de sodio (NaOH) al 0.4 M con una relación 1/15 peso volumen (p/v) con agitación constante a temperatura ambiente 1000 rpm durante 1 h. Enseguida se enjuagó con agua corriente 15 a 20 veces para eliminar el excedente de NaOH en la muestra y remover los residuos de minerales y metales (Juárez, 2024; Amador-Mendoza *et al*., 2025).

En la desmineralización se utilizó ácido clorhídrico (HCl) al 0.6 N con una relación 1/15 p/v con agitación constante a temperatura ambiente, 1000 rpm durante 3 h. Las muestras fueron enjuagadas de 15 a 20 veces para retirar el excedente de HCl removiendo las proteínas y materia orgánica, así como restos el músculo, obteniendo así quitina (Juárez, 2024; Amador-Mendoza *et al*., 2025).

La desacetilación para la obtención de quitosano, se realizó con NaOH al 40 % en una relación 1/15 p/v, agitación constante y temperatura ambiente a 1000 rpm durante 1 h. Enseguida se enjuagó con agua corriente 15 a 20 veces para retirar el excedente de NaOH que se encuentre presente en la muestra, este proceso se emplea para convertir la quitina el quitosano puro eliminando los grupos acetilo (Juárez, 2024; Amador-Mendoza *et al*., 2025).

Método extracción asistida por ultrasonido (EAU). Se realizó con mediante ultrasonicador UP50H Hielscher en cada etapa. En la desmineralización se utilizó NaOH 1 M durante 10 minutos y agitación intermedia. La desproteinización fue realizada con HCl 1 N durante 5 minutos y agitación intermedia. La desacetilación se llevó a cabo con NaOH 20% M durante

3 minutos y agitación intermedia (Amador-Mendoza *et al*., 2025).

El rendimiento del quitosano se determinó con la siguiente fórmula:

$$RG=\frac{RR}{RT}*100 \quad (1)$$

Dónde:

RT = Cantidad en gramos de la muestra inicial, RR = Cantidad en gramos del producto final (quitosano).

Características físico-químicas

Espectrofotometría infrarroja con diagrama de Fourier (FTIR). Se utilizó un espectrofotómetro UV-Vis GENESYS™ 10S con el que se realizó la caracterización en la región de 500 - 4000 cm^{-1}. Se realizó una determinación potenciométrica para obtener el grado de N-desacetilación y la imagen del comportamiento de las muestras en toda la región. Se preparó una solución con 0.05 g de quitosano y 0.5 ml de una solución de NaOH en una relación 1/10 p/v la cual fue valorada en el espectrofotómetro. Se obtuvo una curva de pH vs ml de NaOH, la cual presentó dos puntos de inflexión, la diferencia entre ellos se correspondió a la cantidad de ácido requerido para protonar los grupos amino del quitosano, la concentración de éstos se determinó utilizando la siguiente expresión:

$$\%NH_2=\frac{16.1\ (x * y)}{w}\ f \quad (2)$$

Dónde

y = es el punto de inflexión mayor, x = corresponde al punto de inflexión menor, ambos expresados como volúmenes, f = es la molaridad de la solución de NaOH, w = es la masa en gramos de la muestra y 16.1es el factor asociado al tipo de proteína.

Porcentaje de mineralización y desproteinización

Se midieron cenizas por triplicado de quitosano mediante incineración, siguiendo la técnica de Aguilar y Bustamante (2019), Bautista y Hernández (2021) y Juárez (2024). Se colocaron 6 crisoles en una mufla durante 6 horas a 500 ºC con 2 g de muestra por crisol. Una vez frios,

se pesaron y se calculó el porcentaje de cenizas por diferencia de peso mediante la fórmula siguiente:

$$\%C=\left(\frac{Mf - Mi}{M}\right) *100 \quad (3)$$

Dónde:

%C= Porcentaje de ceniza, Mf = Peso del crisol + muestra destruida (gr), Mi= Peso del crisol (gr) y M= Peso de la muestra antes de destruirla.

El porcentaje de minerales (%M) fue considerado directamente proporcional al %C. Con el promedio de cada una de las muestras se calcularon los porcentajes de desmineralización a través de la siguiente fórmula:

$$\%DM = ((\%C1 + \%C2 + \ldots\ldots \%Cn) / n) -100 \quad (4)$$

Dónde:

%DM= Porcentaje de desmineralización, %C= Porcentaje de ceniza, n= Número de muestra.

La desproteinización se realizó por el método Kjeldahl (método AOAC 984.13 protein crude) como lo refiere Hernández *et al.* (2009), Millones y José (2020), Juárez (2024). El método Kjeldahl se basa en una digestión, seguida de una destilación y termina con una titulación. En este trabajo se utilizó micro Kjeldahl con 0.1 gr de quitosano por triplicado. La digestión se realizó con 3 ml de ácido sulfúrico concentrado durante 30 min y la destilación con hidróxido de sodio durante 90 minutos. Se tituló con HCl al 1 M lentamente en la muestra destilada hasta el vire de color.

El porcentaje de proteínas (Pr) se determinó con la siguiente ecuación:

$$\%Pr = \frac{(14.\ 01)\ (N)\ (V)\ (100)\ (F)}{m\ (1000)} \quad (5)$$

Dónde: N = Normalidad del HCl, V = Vol. de HCl usado para titular la muestra en ml – Vol. de HCl usado para titular el blanco en ml, 14. 01= Peso atómico del Nitrógeno, m = Peso de la muestra en gramos y F = 6. 25 (factor de conversión para proteínas en general).

Color

Para determinar el color se utilizó un Medidor de Colorimetría CR-400 y su panel de colores en la página https://www.nixsensor.com/free-color-converter/ (Juárez, 2024)

Análisis estadísticos

La comparación de los métodos utilizados se realizó con prueba t de Welch con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y un nivel de confianza del 95 % (West, 2021 y Cavus y Yazıcı 2021).

Resultados y discusiones

En el cuadro 1, se observó que el MQT consumió mayores cantidades de agua en total (85.5 L vs 9) e NaOH (940 g vs 240 g) en las etapas de desmineralización, desproteinización y desacetilación, mientras que la EAU redujo significativamente el uso de agua y el tiempo de proceso (3 h vs 5h), aunque en algunos casos requirió más HCl y NaOH. Se evidenció que la desacetilación en la EAU disminuyó de forma significativa el consumo de NaOH y el tiempo, mostrando una mayor eficiencia frente al MQT.

Cuadro 1. Comparativo de la cantidad de reactivos gastados en el proceso de extracción de quitosano (100 g) por el MQT y EAU.

Proceso	Reactivo	MQT	Tiempo (h)	EAU	Tiempo (h)	Diferencia (%)	Diferencia (veces)
Desmineralización	HCl (mL)	73.8	01:00	83	01:40	12.47	1.12
	Agua (L)	28.5		1		2750.00	28.5
Desproteinización	NaOH (g)	24	03:00	40	00:50	66.67	1.67
	Agua (L)	28.5		1		2750.00	28.5
Desacetilación	NaOH (g)	900	01:00	200	00:30	350.00	0.22
	Agua	28.5		7		307.14	4.07

	(L)						

El rendimiento obtenido de quitosano fue significativamente ($p < 0.05$) mayor con el método de EAU (31.35 g) (Cuadro 2). Este rendimiento fue aproximadamente 3.21 veces superior al MQT, indicando una mayor eficiencia de extracción bajo las condiciones experimentales evaluadas. El porcentaje de desmineralización y desproteinización fue significativamente más alto en el quitosano obtenido mediante el MQT (98.48 y 91.96, respectivamente) y en cuanto a coloración fueron muy diferentes.

El método EAU requirió menor cantidad de reactivos, agua y tiempo que MQT, lo que implica una ventaja potencial en términos de eficiencia y sostenibilidad. El menor consumo de insumos puede reducir los costos de operación, mientras que la reducción del tiempo puede favorecer un menor consumo energético coincidiendo con estudios que señalan el potencial de las tecnologías asistidas para disminuir algunas limitaciones ambientales de los métodos convencionales de extracción de quitina y quitosano (Borja-Urzola *et al*., 2020; Mohan *et al*., 2023).

Como no hay datos de rendimiento de la extracción para esta fuente de quitosano (pez diablo) se comparó con el rendimiento de escamas de otros peces y camarón. Muslin *et al*. (2012), reportaron que el rendimiento del quitosano de escamas del pez carpa *(Labeo Rohita)* fue de 7.72 %. Tello (2017), obtuvo un rendimiento de quitosano de escamas de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) de 7.79 %. Boarin y Graciano (2016), obtuvieron de escamas de Tilapia del Nilo *(Oreochromis niloticus)* de 1.87 %. Jonas (2021) reportó un rendimiento del quitosano mayor al 22 % a partir de escama de camarón. En este trabajo, el rendimiento del quitosano de las placas quitinosas del pez diablo por el método EAU fue más del doble de lo reportado, con el MQT el rendimiento también está por encima de lo reportado, excepto para el quitosano de camarón. Lo que anterior indica el alto potencial de la técnica EAU para la extracción de quitosano de peces diablo.

Características físico-químicas

Como se puede observar (Cuadro 2), hubo diferencias significativas ($p<0.05$) entre los porcentajes de desmineralización, desproteinización, desacetilación y color entre los métodos de extracción. Los valores de desmineralización y desproteinización fueron más altos para el MQT, indicando por un lado que, hubo una eliminación más completa de carbonatos y sales por la alta cantidad de HCl utilizada; y por el otro lado que, la cantidad de NaOH durante un tiempo más tiempos favoreció la reacción para obtener un quitosano más homogéneo, aunque

se pone en riesgo de degradación parcial de la estructura del biopolímero (Singh *et al*., 2019; Mwita *et al*., 2024). Esto implican entonces que el MQT aunque tiene un mayor consumo de reactivos y tiempos prolongados, resulta en un quitosano más limpio de residuos de nitrógeno y minerales, pero es menos sostenible en comparación con la EAU, que reduce tiempos y agua, aunque deja más residuos.

El porcentaje de desacetilación mide cuántos grupos acetilo (-$COCH_3$) de la quitina fueron eliminados para transformarla en quitosano. En este estudio, fue más eficiente la eliminación de estos grupos el método EAU (70%) con respecto al MQT (55%). Aunque el quitosano tenga menos residuos proteicos y minerales no significa que tenga mayor porcentaje de desacetilación, ya que se trata de parámetros independientes, mientras el primero mide pureza física, el otro mide la modificación química. El porcentaje alto implica más grupos amino libres (-NH_2), lo que influye en solubilidad, reactividad y aplicaciones biomédicas en un momento dado, aunque hay que corroborar el dato antes de sacar conclusiones adelantadas.

En cuanto al color, ambos son un poco oscuros a la vista lo que quita un poco de atractivo para fines comerciales. Sin embargo, existen diversas técnicas para poder blanquearlos (Gonçalves *et al*., 2017; Mwita *et al*., 2024).

Cuadro 2. Rendimiento y variables fisicoquímicas de quitosano extraído por los métodos QT y EAU.

Rendimiento (g/100g)	MQT	EAU
Quitosano	17.81 ± 0.85[a]	31.35 ± 0.71[b]
Características fisicoquímicas		
Desmineralización (%)	98.48 ± 0.91[a]	96.8 ± 0.89[b]
Desproteinización (%)	91.96 ± 0.74[a]	74 ± 0.82[b]
Desacetilación (%)	55[a]	70[b]
Color HEX	#8B7547	#948875
CC	Marrón dorado oscuro / marrón arcilla	Marrón grisáceo / Taupe / Caqui suave

Media y desviacio2n estándar de tres réplicas. a, b: Indican diferencias significativas. Color HEX corresponde al código obtenida por colorímetro para determinar color en el panel de colores.

Espectrofotometría infrarroja con diagrama de Fourier (FTIR)

El FTIR mostró el comportamiento y estiramientos en las longitudes de onda características del quitosano reportadas por Callejas (2000), indicando que efectivamente se evaluó quitosano extraído por los métodos evaluados (MQT y EAU) (Figura 1). El comportamiento del quitosano extraído por ambos métodos fue muy similar, fueron notorias los grupos funcionales en las bandas de absorción de longitud de onda correspondientes entre 3433 y 3255 cm^{-1} para el estiramiento del grupo hidroxilo (O-H), los picos se estiraron alcanzando el punto característico de una amina secundaria (N-H). En la región de la longitud de onda comprendida entre 3097 a 2914 cm^{-1} se observaron dos bandas de absorción moderada correspondientes a las vibraciones de tensión, propias de grupos metilo (C-H). Así mismo, en los picos 1622 a 1634 cm^{-1} muestran bandas de absorción de intensidad moderada correspondiente al estiramiento propio de una amida primaria del grupo carbonilo (C=O). Para determinar si tenían el mismo comportamiento el quitosano extraído por los métodos evaluados con quitosano de camarón (comercial) se compararon en el FTIR. Todos tienen el mismo comportamiento en las longitudes características para quitosano solo difieren en el tamaño del estiramiento.

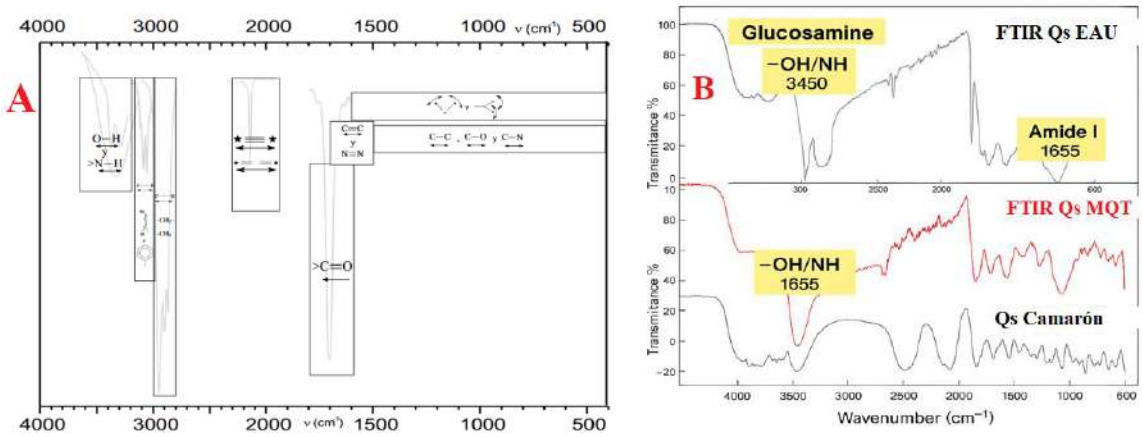


Figura 1. A. Regiones básicas de un espectro infrarrojo IR (Callejas, 2000). B. Comportamiento del quitosano extraído por los métodos MQT y EAU comparado con el quitosano de camarón (comercial).

Conclusión

El método EAU es el más eficiente ya que mejora el rendimiento, reduce la cantidad de reactivos, y tiempo. En cuanto a los porcentajes mineralización y desproteinización se recomienda verificar los datos. El color obtenido en el quitosano por ambas técnicas puede mejorarse mediante técnicas de coloración. El método EAU es más recomendable en términos de rendimiento e impacto ambiental.

Literatura citada

Aguilar, H.A. I., y Bustamante, F. P. G. (2019). Determinación de la proteína y grasa de tres tipos de hongos comestibles: Champiñón *(Agaricus bisporus)*, Pleurotus *(Pleurotus ostreatus)* y Shiitake *(Lentinus edodes)*, 20 pp. Disponible en: https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/2566

Alvarado-Arcia, A., Martínez-Salinas, R. I., Barba-Macías, E., Morales-López, J. J., y Torres-Dosal, A. (2024). Metales pesados en músculo de *Pterygoplichthys pardalis* y especies acompañantes en Pantanos de Centla, Tabasco, México. *Hidrobiológica, 34*(3), 191–206. https://doi.org/10.24275/ojiw3057

Amador-Mendoza, A., Juárez-López, R., Martínez-Galero, N. X., García-Muñoz, M. Á., Palacios-Torres, R. E., y Aguilera-Morales, M. E. (2025). Extracción y caracterización de quitosano a partir de placas dérmicas del pez diablo (Hypostomus plecostomus). *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, *12*(2), e4151. Epub 05 de septiembre de 2025.https://doi.org/10.19136/era.a12n2.4151

Amir, N., Syahrul, y Djamaluddin, N. (2020). Suckermouth catfish (*Pterygoplichthys pardalis*) in Wajo Regency, South Sulawesi Province: The heavy metal content of lead (Pb), mercury (Hg) and arsenic (As). *Agrikan: Jurnal Agribisnis Perikanan, 13*(2), 168–174. https://doi.org/10.29239/j.agrikan.13.2.168-174

Aranaz, I., Alcántara, A. R., Civera, M. C., Arias, C., Elorza, B., Heras, C. A. y Acosta, N. (2021). Chitosan: An overview of its properties and applications. *Polymers, 13*(19), 3256. https://doi.org/10.3390/polym13193256

Bautista, J. I., y Hernández, J. J. A. (2021). Determinación del carbono orgánico por el método químico y por calcinación. Ingeniería y Región, 26: 20-28 pp. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/358655904_Determinacion_del_carbono_organico_por_el_metodo_quimico_y_por_calcinacion

Bertrand, M., Simonin, S. y Bach, B. (2024). Applications of chitosan in the agri-food sector: A review. *Carbohydrate Research*, *543*, 109219. https://doi.org/10.1016/j.carres.2024.109219

Boarin, A. L., y Graciano, F. G. (2016). Alkali process for chitin extraction and chitosan production from Nile tilapia *(Oreochromis niloticus)* scales. Latin American Journal of Aquatic Research, 44(4): 683-688 pp. DOI: https://doi.org/10.3856/vol44-issue4-fulltext-3

Borja-Urzola, A. del C., García-Gómez, R. S., Flores, R., y Durán-Domínguez-de-Bazúa, M. del C. (2020). Chitosan from shrimp residues with a saturated solution of calcium chloride in methanol and water. *Carbohydrate Research*, *497*, 108116. https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.108116

Callejas, F. R. (2000). Tablas de Espectroscopía Infrarroja. Departamento de Física y Química, UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México): Mexico City, Mexico, 14 pp. Disponible en: https://www.studocu.com/es-mx/document/utel-universidad-en-linea-de-mexico/quimica/tablas-de-espectroscopia-infrarroja/30510787?sid=%24device%3A383aa74e-f2d9-4dd8-b9f5-110d7ad69d471786858313

Cavus, M. y Yazıcı, B. (2020). Testing the equality of normal distributed and independent groups' means under unequal variances by doex package. *The R Journal*, *12*(2), 189–208. https://doi.org/10.32614/RJ-2021-008

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2020). Control del pez diablo, especie exótica de la Cuenca Don Martín. Gobierno de México. Disponible en: https://www.gob.mx/conanp/articulos/control-del-pez-diablo-especie-exotica-de-la-cuenca-don-martin?utm_source=chatgpt.com

El-Naggar, M. Salaah, S., El-Shabaka, H., Abd El-Rahman, F. A., Khalil, M., y Suloma, A. (2021). Efficacy of dietary chitosan and chitosan nanoparticles supplementation on health status of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.). *Aquaculture Reports*, *19*, 100628. https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2021.100628

Gamage, A., Jayasinghe, N., Thiviya, P., Wasana, M. L. D., Merah, O., Madhujith, T. y Koduru, J. R. (2023). Recent Application Prospects of Chitosan Based Composites for the Metal Contaminated Wastewater Treatment. *Polymers*, *15*(6), 1453. https://doi.org/10.3390/polym15061453

Stolbunov, I. A., Gusakov, V. A., Dien, T. D., y Thanh, N. T. H. (2021). Food spectrum, trophic and length-weight characteristics of nonindigenous suckermouth armored catfishes *Pterygoplichthys* spp. (Loricariidae) in Vietnam. *Inland Water Biology*, *14*(5), 597–605. https://doi.org/10.1134/S1995082921050163

Gonçalves, I., Nunes, C., Mendes, S., Martins, L. O., Ferreira, P. y Coimbra, M. A. (2017). CotA laccase-ABTS/hydrogen peroxide system: An efficient approach to produce active and decolorized chitosan-genipin films. Carbohydrate Polymers, 175, 628–635. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.07.0829

Hamed, I., Özogul, F., Regenstein, J. M., y Özogul, Y. (2016). Industrial applications of crustacean by-products (chitin, chitosan, and chitooligosaccharides): A review. *Trends in Food Science y Technology*, *48*, 40–50. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.11.007

Hernández, C. H., Águila, A. E., Flores, A, O., Viveros, N. E. L., y Ramos, C. E. (2009). Obtención y caracterización de quitosano a partir de exoesqueletos de camarón. Superficies y vacío, 22(3): 57-60 pp. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-35212009000300012yscript=sci_abstractytlng=pt

Juárez, L. R. (2024). Obtención y caracterización de quitosano a partir de la coraza tegumentaria de pez diablo (*Hypostomus plecostomus*). [Tesis de ingeniería, Ingeniería en Acuicultura, Universidad del Papaloapan]. Repositorio Institucional de la Universidad del Papaloapan. https://www.unpa.edu.mx/bibliotecas/images/Tesis/Tesis%20Loma/Acuicultura/X1-2024-01%20RAFAEL%20JU%C3%81REZ%20L%C3%93PEZ.pdf

Ke, C. L., Deng, F. S., Chuang, C. Y. y Lin, C. H. (2021). Antimicrobial Actions and Applications of Chitosan. *Polymers*, *13*(6), 904. https://doi.org/10.3390/polym13060904

Kou, S. G., Peters, L. M. y Mucalo, M. R. (2021). Chitosan: A review of sources and preparation methods. *International Journal of Biological Macromolecules*, *169*, 85–94. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.005

Kozma, M., Acharya, B. y Bissessur, R. (2022). Chitin, Chitosan, and Nanochitin: Extraction, Synthesis, and Applications. *Polymers*, *14*(19), 3989. https://doi.org/10.3390/polym14193989

Macea, R. B., De Hoyos, C. F., Montes, Y. G., Fuentes, E. M., y Ruiz, J. I. R. (2015). Síntesis

y propiedades de filmes basados en quitosano/lactosuero. Polímeros, 25: 58-69 pp. DOI: https://doi.org/10.1590/0104-1428.1558

Martin, X. K. A., Hauzoukim, K. N., Balange, A. K., Chouksey, M. K., y Gudipati, V. (2017). Functionality of chitosan in batter formulations for coating of fish sticks: Effect on physicochemical quality. *Carbohydrate Polymers, 169*, 433–440. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.04.041

Matouri, M., Liu, Z., y Saldaña, M. D. A. (2024). Production of chitosan from shrimp shell using ultrasound followed by subcritical water hydrolysis. *Food Chemistry, 441*, 138248. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138248

Mei, Z., Kuzhir, P. y Godeau, G. (2024). Update on Chitin and Chitosan from Insects: Sources, Production, Characterization, and Biomedical Applications. *Biomimetics*, *9*(5), 297. https://doi.org/10.3390/biomimetics9050297

Mendoza, R., Contreras, S., Ramírez, C., Koleff, P., Álvarez, P., y Aguilar, V. (2007). Los peces diablo. Biodiversitas, 70: 1-5 pp. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/265362591_los_Peces_diablo

Millones, A., y Jose, J. (2020). Validación del Método AOAC 990.03 (Dumas) armonizado a Kjeldahl en el análisis de proteína en harina de pescado, 117 pp. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.12893/8771

Mohammadi, P., Taghavi, E., Foong, S. Y., Rajaei, A., Amiri, H., de Tender, C., Peng, W., Lam, S. S., Aghbashlo, M., Rastegari, H., y Tabatabaei, M. (2023). Comparison of shrimp waste-derived chitosan produced through conventional and microwave-assisted extraction processes: Physicochemical properties and antibacterial activity assessment. *International Journal of Biological Macromolecules, 242*(Pt. 2), 124841. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124841

Mohan, K., Rajan, D. K., Ganesan, A. R., Divya, D., Johansen, J. y Zhang, S. (2023). Chitin, chitosan and chitooligosaccharides as potential growth promoters and immunostimulants in aquaculture: A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*, *251*, 126285. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126285

Molina, G. S. I. (2018). Analisis de los acidos grasos del Pez diablo como potencial biocombustible, 134 pp. Disponible en:

http://repositoriodigital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/handle/123456789/2964

Monge, N. A. Y. (2024). *Diferencias en Pterygoplichthys spp. mediante código de barras en cuatro localidades de México* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco]. Repositorio Institucional de la UAM-Xochimilco. Repositorio Institucional UAM-Xochimilco

Muslin, T., Habibur, M. Ara, H., y Azizur R. (2012). Chitosan and Carboxymethyl Chitosan from Fish Scales of Labeo rohita. Dhaka Univ. J. Sci, 61(1): 145-148 pp. https://doi.org/10.3329/dujs.v61i1.15116

Mwita, C. S., Muhammad, R., Nettey-Oppong, E. E., Enkhbayar, D., Ali, A., Ahn, J., Kim, S.W., Seok, Y. S. y Choi, S. H. (2024). Chitosan Extracted from the Biomass of Tenebrio molitor Larvae as a Sustainable Packaging Film. Materials, 17(15), 3670. https://doi.org/10.3390/ma17153670

Niu, Y. y Hu, W. (2024). Preparation, characterization and application in environmental protection of low-molecular-weight chitosan: a review. *Sustainable Environment Research*, *34*, 29. https://doi.org/10.1186/s42834-024-00236-8

Pakizeh, M., Moradi, A. y Ghassemi, T. (2021). Chemical extraction and modification of chitin and chitosan from shrimp shells. *European Polymer Journal*, *159*, 110709. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110709

Quintana, Y., Keppeler, F. W. y Winemiller, K. O. (2023). Does invasion by armored catfish shift trophic ecology of native fishes? Evidence from stable isotope analysis. *Ecology*, *104*(5), e4024. https://doi.org/10.1002/ecy.4024

Ruíz-Aguilar, M. Y., Montes-Molina, J. A., Castañón-González, J. H., Gutiérrez-Miceli, F. A., Hernández-Guzmán, M., López-López, H., Ruíz-Valdiviezo, V. M., y Villalobos-Maldonado, J. J. (2023). Uso de la harina del pez diablo (*Pterygoplichthys* spp.) en la fertilización orgánica del tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 39*, 159–169. https://doi.org/10.20937/RICA.54848

Singh, A., Benjakul, S. y Prodpran, T. (2019). Ultrasound-assisted extraction of chitosan from squid pen: Molecular characterization and fat binding capacity. Journal of Food Science, 84(2), 224–234. https://doi.org/10.1111/1750-3841.14439

Soud, S. A., Ali, M. A., Alhadban, W. G., y Taha, A. A. (2024). Extraction and characterization of chitin and chitosan from local Iraqi fish scales. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, *55*(5), 1728–1733. https://doi.org/10.36103/1zah0b15

Tello, P. E. (2017). Evaluación del quitosano obtenido a partir de escamas de la trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) por métodos químicos y biológico, 299 pp. Disponible en: http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/4425

Vallejo-Domínguez, D., Rubio-Rosas, E., Aguila-Almanza, E., Hernández-Cocoletzi, H., Ramos-Cassellis, M. E., Luna-Guevara, M. L., Rambabu, K., Manickam, S., Munawaroh, H. S. H., y Show, P. L. (2021). Ultrasound in the deproteinization process for chitin and chitosan production. *Ultrasonics Sonochemistry*, *72*, 105417. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105417

Wei, H., Liang, Y., Luo, Q., Gu, D., Mu, X. y Hu, Y. (2022). Environmental-related variation of stoichiometric traits in body and organs of non-native sailfin catfishes *Pterygoplichthys* spp. *Ecology and Evolution*, *12*(11), e9483. https://doi.org/10.1002/ece3.9483

Weißpflog, J., Vehlow, D., Müller, M., Kohn, B., Scheler, U., Boye, S. y Schwarz, S. (2021). Characterization of chitosan with different degree of deacetylation and equal viscosity in dissolved and solid state – Insights by various complimentary methods. *International Journal of Biological Macromolecules*, *171*, 242–261. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.01.010

West, R. M. (2021). Best practice in statistics: Use the Welch t-test when testing the difference between two groups. *Annals of Clinical Biochemistry*, *58*(4), 267–269. https://doi.org/10.1177/0004563221992088

Influencia del almacenamiento en seco, la rehidratación y las condiciones de conservación sobre la calidad postcosecha de *Tulipa spp*. cv. 'Orange Juice'

Pablo Balderrama-Jiménez[70], María de los Ángeles Rodríguez-Elizalde

Resumen

La calidad postcosecha del tulipán constituye un factor determinante para su valor comercial, debido a que durante el almacenamiento los tallos continúan experimentando procesos fisiológicos que afectan su apariencia y vida útil. El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia del tiempo de almacenamiento en seco, los tratamientos de rehidratación y las condiciones de conservación sobre la calidad postcosecha de tallos florales de tulipán (Tulipa spp.) cultivar 'Orange Juice'. Se utilizaron 270 tallos florales distribuidos en un diseño completamente al azar, considerando tres periodos de almacenamiento en seco (0, 7 y 14 días), tres tratamientos de rehidratación (agua, sacarosa y Chrysal®) y dos condiciones de conservación (temperatura ambiente y cámara frigorífica). Se evaluaron la longitud del tallo, el peso fresco, la curvatura y el estado del botón floral mediante análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$). El tiempo de almacenamiento fue el factor que influyó significativamente en todas las variables evaluadas, mientras que el ambiente de conservación afectó el peso fresco, la curvatura y el estado del botón floral. Los tratamientos de rehidratación únicamente modificaron significativamente la longitud del tallo. La refrigeración permitió conservar un mayor peso fresco, reducir parcialmente la curvatura y retrasar la apertura floral, mientras que el efecto de las soluciones de rehidratación dependió del estado fisiológico adquirido durante el almacenamiento. Se concluye que el mantenimiento de la cadena de frío constituye la estrategia más efectiva para preservar la calidad fisiológica, ornamental y comercial del tulipán durante la postcosecha.

Palabras clave: Tulipa spp., almacenamiento en seco, rehidratación, refrigeración, calidad postcosecha.

Abstract

Postharvest quality is a key factor determining the commercial value of cut tulip flowers, as physiological processes continue after harvest, affecting their appearance and vase life. The objective of this study was to evaluate the influence of dry storage duration, rehydration treatments, and storage conditions on the postharvest quality of *Tulipa* spp. cv. 'Orange Juice'.

[70] Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México–Texcoco, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C.P. 56230, México. al20101901@chapingo.mx, mrodrigueze@chapingo.mx

A total of 270 commercial flower stems were arranged in a completely randomized design, considering three dry storage periods (0, 7, and 14 days), three rehydration treatments (water, sucrose, and Chrysal®), and two storage conditions (ambient temperature and cold storage). Stem length, fresh weight, stem curvature, and floral bud stage were evaluated. Data were analyzed using analysis of variance (ANOVA), and means were compared using Tukey's test ($P \leq 0.05$). Dry storage duration significantly affected all evaluated variables, whereas storage conditions significantly influenced fresh weight, stem curvature, and floral bud stage. Rehydration treatments significantly affected only stem length. Cold storage preserved higher fresh weight, reduced stem curvature, and delayed flower opening, whereas the effectiveness of rehydration treatments depended on the physiological status acquired during storage. These findings indicate that maintaining the cold chain is the most effective strategy for preserving the physiological, ornamental, and commercial quality of cut tulip stems during postharvest handling.

Keywords: *Tulipa* spp., dry storage, rehydration, cold storage, postharvest quality.

Introducción

La calidad postcosecha constituye uno de los principales factores que determinan el valor comercial de las flores de corte, ya que influye directamente sobre su vida en florero, apariencia y aceptación por el consumidor. Durante las etapas de almacenamiento, transporte y comercialización, los tallos continúan experimentando procesos fisiológicos como la pérdida de agua, el consumo de reservas energéticas y cambios metabólicos asociados con la senescencia, los cuales pueden comprometer su calidad ornamental y reducir su vida útil (Kader, 2002; Reid & Jiang, 2012). En consecuencia, el desarrollo de estrategias que permitan conservar la calidad de las flores después de la cosecha representa uno de los principales retos para la producción y comercialización de especies ornamentales.

El tulipán es una de las flores de corte de mayor importancia económica y ornamental a nivel mundial; sin embargo, presenta características fisiológicas que hacen particularmente complejo su manejo postcosecha. A diferencia de otras especies ornamentales, los tallos de tulipán mantienen actividad metabólica después del corte, por lo que continúan creciendo y desarrollándose durante el almacenamiento y la vida en florero. Como consecuencia, pueden presentarse fenómenos como elongación del tallo, incremento de la curvatura, pérdida de peso fresco y avance en la apertura floral, los cuales afectan directamente la calidad comercial del producto (Kamenetsky & Okubo, 2012; van Doorn & Woltering, 2011).

Con el propósito de reducir estos cambios fisiológicos, la industria florícola emplea diversas estrategias de manejo postcosecha, entre las que destacan el almacenamiento refrigerado y el uso de soluciones de rehidratación con carbohidratos y compuestos preservantes. El

almacenamiento a bajas temperaturas disminuye la intensidad respiratoria, la transpiración y otros procesos metabólicos, favoreciendo la conservación de los tallos durante periodos prolongados (Kader, 2002). Por su parte, las soluciones de rehidratación buscan restablecer el equilibrio hídrico de los tejidos y suministrar compuestos que contribuyan al mantenimiento de la calidad ornamental (Ichimura & Hisamatsu, 1999; Pun & Ichimura, 2003; Sarhan *et al.*, 2023). No obstante, la respuesta a estas estrategias puede variar entre cultivares y depender del tiempo de almacenamiento y de las condiciones posteriores de conservación.

Aunque estas prácticas son ampliamente utilizadas en la producción de flores de corte, aún existe información limitada acerca de la influencia conjunta del tiempo de almacenamiento en seco, las condiciones de conservación y los tratamientos de rehidratación sobre la calidad postcosecha del tulipán bajo condiciones de producción comercial. Esta situación dificulta establecer criterios técnicos que permitan identificar cuáles de estos factores ejercen una mayor influencia sobre la conservación de la calidad comercial y cómo interactúan entre sí durante el manejo postcosecha.

Con base en lo anterior, se planteó la hipótesis de que la calidad postcosecha del tulipán está determinada principalmente por la interacción entre el tiempo de almacenamiento en seco y las condiciones de conservación, mientras que el efecto de los tratamientos de rehidratación depende del estado fisiológico generado por dichos factores.

En este sentido, el objetivo del presente estudio fue evaluar la influencia del tiempo de almacenamiento en seco, los tratamientos de rehidratación y las condiciones de conservación sobre variables asociadas con la calidad postcosecha de tallos florales de tulipán cultivar 'Orange Juice' para flor de corte.

Materiales y métodos

El experimento se realizó en las instalaciones de Producción de Ornamentales La Resurrección, ubicadas en Texcoco, Estado de México, durante marzo y los primeros diez días de abril de 2026. Se utilizaron 270 tallos florales comerciales de tulipán (*Tulipa* spp.) cultivar 'Orange Juice', producidos bajo condiciones protegidas. Los tallos fueron cosechados en estado comercial de corte, cuando el botón floral presentaba inicio de pigmentación ("botón pintando"), y posteriormente se seleccionaron por uniformidad en su estado de desarrollo y calidad comercial. Finalmente, el material vegetal se asignó aleatoriamente a los tratamientos experimentales para reducir la variabilidad atribuible a las características iniciales de los tallos.

El experimento se estableció bajo un Diseño Completamente al Azar (DCA) y se estructuró considerando tres periodos de almacenamiento en seco 0, 7 y 14 días, tres tratamientos de

rehidratación y dos condiciones de conservación posteriores al almacenamiento. Los tratamientos de rehidratación consistieron en agua como testigo (T1), sacarosa comercial a 20 g L^{-1} (T2) y preservante comercial Chrysal® a 1 mL L^{-1} (T3). Cada combinación de los factores evaluados contó con tres repeticiones experimentales, de acuerdo con la estructura del estudio. Los factores experimentales y sus niveles se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Estructura experimental del estudio para evaluar la calidad postcosecha de tulipán (*Tulipa* spp.) cultivar 'Orange Juice'

Factor	Niveles
Almacenamiento en seco	0, 7 y 14 días
Tratamiento de rehidratación	Agua (T1), sacarosa 20 g L^{-1} (T2) y Chrysal® a 1 mL L^{-1} (T3)
Condición de conservación	Temperatura ambiente y cámara frigorífica

Fuente: Elaboración propia.

Los 270 tallos florales se distribuyeron equitativamente entre los tres periodos de almacenamiento (90 tallos por periodo). En el tratamiento correspondiente a 0 días, los tallos fueron evaluados inmediatamente después de la cosecha bajo condiciones ambientales; por ello, este nivel no fue sometido a las dos condiciones de conservación. En contraste, los tratamientos de 7 y 14 días se dividieron, después del almacenamiento, entre temperatura ambiente y cámara frigorífica. En consecuencia, el estudio no correspondió a un diseño factorial completamente balanceado, sino a una estructura experimental en la que el factor condición de conservación se incorporó únicamente para los tratamientos de 7 y 14 días de almacenamiento.

La unidad experimental estuvo constituida por un recipiente con la solución de rehidratación correspondiente y los tallos florales asignados a cada repetición. En el tratamiento de 0 días, cada unidad experimental estuvo integrada por diez tallos florales; mientras que en los tratamientos de 7 y 14 días cada unidad experimental estuvo conformada por cinco tallos, debido a que las repeticiones se dividieron entre las dos condiciones de conservación evaluadas (temperatura ambiente y cámara frigorífica).

Los tallos destinados al almacenamiento permanecieron en seco, conservando el bulbo, dentro de una cámara frigorífica cuya temperatura osciló generalmente entre 5 y 10 °C, registrándose ocasionalmente valores cercanos a 13 °C. Al concluir el periodo de almacenamiento correspondiente, los tallos fueron recortados en la base, se retiró el bulbo y se colocaron en las soluciones de rehidratación previamente preparadas.

Para cada tratamiento de rehidratación se prepararon 3 L de solución, distribuidos en tres recipientes de unicel con capacidad de 1 L, correspondientes a las repeticiones experimentales. Cada recipiente contuvo aproximadamente entre 600 y 700 mL de solución, reponiéndose el volumen cuando fue necesario para mantener condiciones homogéneas durante el periodo de evaluación.

Posteriormente, los tallos se mantuvieron bajo sus respectivas condiciones de conservación hasta la pérdida de calidad comercial, definida por la presencia de apertura floral excesiva, caída de pétalos, pérdida de turgencia o curvatura severa del tallo. Las condiciones ambientales registraron temperaturas aproximadas entre 12 y 30 °C, mientras que los tratamientos refrigerados permanecieron en la cámara frigorífica dentro del intervalo de temperatura previamente descrito. Las evaluaciones se realizaron aproximadamente cada dos días durante toda la vida postcosecha.

Las variables de respuesta consideradas en el estudio y la metodología empleada para su evaluación se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Variables de respuesta evaluadas y metodología de medición

Variable	Unidad	Instrumento o método
Longitud del tallo	cm	Distancia entre la base del tallo y el inicio del botón floral, determinada con una cinta métrica graduada.
Peso fresco	g	Determinado mediante una balanza digital.
Curvatura	°	Ángulo formado por el eje longitudinal del tallo, medido con la aplicación móvil Angulus® (Yonaga LLC, EE. UU.), utilizando como referencia la base del tallo y la región inmediatamente inferior al botón floral.
Estado del botón floral	Escala (1–4)	Evaluación visual: 1 = inicio de pigmentación; 2 = botón completamente coloreado; 3 = flor abierta; 4 = flor completamente abierta con pérdida de calidad comercial.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos se organizaron en una base de datos y se analizaron mediante el programa InfoStat versión 2020. Para cada variable se realizaron análisis de varianza (ANOVA), de acuerdo con la estructura experimental, con el fin de evaluar el efecto del tiempo de almacenamiento, los tratamientos de rehidratación y las condiciones de conservación, así como las interacciones entre estos factores cuando correspondió. Cuando

se detectaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$), las medias se compararon mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. La interpretación de los resultados consideró tanto los efectos principales como las interacciones significativas, debido a que la respuesta de los tratamientos de rehidratación dependió de las condiciones de almacenamiento y conservación.

Resultados y discusión

El análisis de varianza mostró que el tiempo de almacenamiento fue el factor con mayor influencia sobre la calidad postcosecha del tulipán, ya que afectó significativamente todas las variables evaluadas. Por su parte, el ambiente de conservación modificó el peso fresco, la curvatura y el estado del botón floral, mientras que los tratamientos de rehidratación únicamente produjeron diferencias en la longitud del tallo. Asimismo, algunas interacciones entre los factores experimentales resultaron significativas, lo que indica que la respuesta fisiológica de los tallos dependió de la combinación entre el tiempo de almacenamiento, el ambiente de conservación y, en menor medida, las soluciones de rehidratación (Cuadro 3).

Cuadro 3. Significancia de los efectos principales e interacciones del análisis de varianza (ANOVA) para las variables de calidad postcosecha del tulipán

Variable	Tratamiento de rehidratación	Tiempo de almacenamiento	Ambiente de conservación	T × Ti	T × A	T × Ti × A
Longitud del tallo	***	***	ns	***	ns	ns
Peso fresco	ns	***	***	ns	ns	*
Curvatura	ns	***	***	*	*	ns
Estado del botón floral	ns	***	***	ns	ns	*

Fuente: Elaboración propia con base en el análisis estadístico realizado en InfoStat 2020. Nota: ns = no significativo; * = $p \leq 0.05$; ** = $p \leq 0.01$; *** = $p \leq 0.001$; T = tratamiento de rehidratación; Ti = tiempo de almacenamiento; A = ambiente.

A partir de este análisis general, se describen a continuación los efectos observados para cada una de las variables evaluadas.

La longitud del tallo fue influenciada significativamente tanto por el tratamiento de rehidratación como por el tiempo de almacenamiento, además de presentar una interacción significativa entre ambos factores (Cuadro 3). En términos generales, la longitud aumentó conforme transcurrió el periodo de almacenamiento; sin embargo, la magnitud de esta respuesta dependió de la solución de rehidratación aplicada. Los tallos rehidratados con agua

alcanzaron la mayor longitud al finalizar el periodo de evaluación, mientras que Chrysal® mostró un crecimiento más moderado y la sacarosa promovió un incremento inicial que posteriormente tendió a estabilizarse.

El crecimiento observado en los tres tratamientos confirma que el tulipán conserva la capacidad de elongación después de la cosecha, fenómeno conocido como crecimiento residual y ampliamente documentado para esta especie (Kamenetsky & Okubo, 2012; van Doorn & Woltering, 2011). Este comportamiento se relaciona con la expansión celular y con la movilización de reservas presentes en los tejidos, procesos que continúan aun después del corte floral.

El mayor crecimiento registrado en los tallos rehidratados únicamente con agua sugiere que la recuperación de la presión de turgencia favoreció la expansión celular y permitió mantener el crecimiento longitudinal durante un periodo más prolongado. La disponibilidad de agua constituye uno de los principales factores que regulan la expansión de los tejidos vegetales y, por consiguiente, la elongación del tallo (Kader, 2002; Reid & Jiang, 2012). En contraste, la respuesta observada con sacarosa fue menos consistente conforme avanzó el almacenamiento, lo que indica que el suministro exógeno de carbohidratos no mantuvo el mismo efecto durante toda la vida postcosecha. De acuerdo con Pun y Ichimura (2003), la respuesta a la sacarosa depende del estado fisiológico de los tejidos, de la especie y de la concentración utilizada.

Por su parte, los tallos tratados con Chrysal® presentaron una elongación más moderada durante el periodo de evaluación. Aunque este tratamiento no produjo la mayor longitud final, un crecimiento menos pronunciado podría representar una ventaja desde el punto de vista comercial, debido a que la elongación excesiva suele favorecer la curvatura del tallo y reducir la calidad ornamental del tulipán (van Doorn & Woltering, 2011).

En conjunto, estos resultados indican que la solución de rehidratación modifica la expresión del crecimiento residual del tulipán; sin embargo, dicho efecto depende del estado fisiológico adquirido durante el almacenamiento. Este comportamiento coincide con lo reportado por Jahnke *et al.* (2013), quienes señalaron que el almacenamiento refrigerado no detiene completamente la elongación del tallo, sino que modifica su magnitud de acuerdo con las condiciones posteriores de manejo.

De manera complementaria, el peso fresco fue influenciado significativamente por el tiempo de almacenamiento y el ambiente de conservación, mientras que el tratamiento de rehidratación no presentó un efecto principal significativo (Cuadro 3). Asimismo, se detectaron interacciones significativas entre tiempo de almacenamiento × ambiente y tratamiento × tiempo de almacenamiento × ambiente, lo que indica que la respuesta de esta

variable dependió de la combinación de dichos factores y no del efecto aislado de las soluciones de rehidratación.

En términos generales, los tallos conservados en cámara frigorífica mantuvieron mayores valores de peso fresco que aquellos mantenidos posteriormente a temperatura ambiente, particularmente después de siete y catorce días de almacenamiento. Por el contrario, los menores valores se registraron en los tratamientos conservados bajo condiciones ambientales, lo que evidencia una mayor pérdida de agua conforme avanzó el periodo de conservación.

Aunque el análisis estadístico detectó una interacción significativa entre tratamiento, tiempo de almacenamiento y ambiente de conservación, el patrón general observado indica que la influencia de las soluciones de rehidratación fue menor que la ejercida por la temperatura. Esto sugiere que la eficacia de dichas soluciones dependió del estado fisiológico de los tallos al momento de la rehidratación y de las condiciones de conservación posteriores, por lo que ninguna presentó una ventaja consistente bajo todas las combinaciones experimentales.

Desde el punto de vista fisiológico, el peso fresco constituye un indicador indirecto del estado hídrico de los tejidos vegetales. Un mayor peso refleja una mejor conservación de la turgencia celular y, en consecuencia, una menor pérdida de agua durante la postcosecha. La refrigeración disminuye la intensidad respiratoria y la transpiración, reduciendo el consumo de reservas y favoreciendo el mantenimiento del equilibrio hídrico de los tallos florales (Kader, 2002; Reid & Jiang, 2012). Este comportamiento explica por qué las diferencias entre los ambientes de conservación se hicieron más evidentes conforme aumentó el tiempo de almacenamiento.

Los resultados obtenidos también muestran coherencia con el comportamiento observado en las demás variables evaluadas. Los tallos que conservaron un mayor peso fresco fueron los mismos que presentaron menor curvatura y un desarrollo floral más lento, lo que evidencia que el mantenimiento del contenido de agua estuvo estrechamente relacionado con una mejor calidad postcosecha.

Desde una perspectiva comercial, estos resultados resaltan la importancia del manejo de la cadena de frío durante el almacenamiento y la distribución del tulipán. La conservación del peso fresco favorece la apariencia visual, la firmeza del tallo y la vida útil de las flores de corte, aspectos que influyen directamente en su calidad comercial. En consecuencia, bajo las condiciones evaluadas, el control de la temperatura representó una estrategia de manejo con mayor impacto sobre la calidad postcosecha que la aplicación aislada de soluciones de rehidratación.

La conservación del estado hídrico de los tallos también se reflejó en su arquitectura durante la postcosecha. La curvatura fue influenciada significativamente por el tiempo de almacenamiento y el ambiente de conservación, además de presentar interacciones significativas entre tratamiento × tiempo y tratamiento × ambiente (Cuadro 3), lo que indica que el doblamiento de los tallos dependió de la combinación de estos factores.

En términos generales, la curvatura aumentó conforme transcurrió el almacenamiento; sin embargo, este incremento fue menor en los tallos conservados bajo refrigeración. En particular, la combinación del tratamiento T2 con cámara frigorífica presentó los menores niveles de doblamiento, mientras que el tratamiento T3 después de catorce días de almacenamiento registró la mayor curvatura.

Este comportamiento resulta consistente con la fisiología propia del tulipán. A diferencia de otras flores de corte, los tallos continúan creciendo después de la cosecha y dicho crecimiento no siempre ocurre de manera uniforme. La elongación diferencial entre distintas regiones del tallo, regulada principalmente por gradientes hormonales y respuestas gravitropicas, favorece el arqueamiento característico de esta especie (van Doorn & Woltering, 2011). En consecuencia, la curvatura no representa únicamente un síntoma de deterioro, sino la manifestación visible de procesos fisiológicos que permanecen activos durante la postcosecha.

La menor curvatura observada bajo refrigeración sugiere que la disminución de la actividad metabólica redujo la velocidad de elongación celular y, por tanto, limitó el crecimiento diferencial responsable del doblamiento. Este comportamiento coincide con la mejor conservación del peso fresco observada previamente, ya que un adecuado estado hídrico contribuye a mantener la firmeza estructural del tallo y reduce parcialmente las deformaciones asociadas al crecimiento residual.

Debe señalarse que esta variable presentó un coeficiente de variación elevado, reflejando la alta variabilidad biológica propia del fenómeno. La curvatura depende simultáneamente de factores anatómicos, fisiológicos y ambientales, por lo que pequeñas diferencias individuales entre tallos pueden traducirse en respuestas considerablemente distintas dentro de un mismo tratamiento. Aun así, la tendencia general mostró que el ambiente de conservación ejerció una influencia mucho mayor que las soluciones de rehidratación sobre la arquitectura final de los tallos.

Desde una perspectiva comercial, estos resultados adquieren especial relevancia, ya que el arqueamiento constituye uno de los principales criterios de rechazo en flores de corte. Por ello, la reducción de la curvatura mediante un adecuado manejo de la temperatura representa

una estrategia efectiva para preservar la calidad ornamental del tulipán durante el almacenamiento y la comercialización.

El estado del botón floral también fue influenciado principalmente por el tiempo de almacenamiento y el ambiente de conservación (Cuadro 3). En contraste, los tratamientos de rehidratación no mostraron un efecto significativo sobre esta variable, mientras que únicamente la interacción entre tiempo de almacenamiento y ambiente de conservación resultó significativa. Esto indica que la velocidad de apertura floral dependió principalmente de las condiciones térmicas posteriores al almacenamiento y no de la solución de rehidratación utilizada.

En términos generales, los tallos mantenidos bajo condiciones ambientales continuaron avanzando en su proceso de apertura conforme aumentó el tiempo de almacenamiento, mientras que aquellos conservados en cámara frigorífica permanecieron en estados de desarrollo más tempranos durante todo el periodo de evaluación. Esta respuesta evidencia que la refrigeración retrasó el desarrollo floral y permitió conservar los botones por más tiempo dentro del estado comercial de corte.

Desde el punto de vista fisiológico, la apertura floral representa un proceso altamente dependiente de la actividad metabólica de los tejidos. La expansión de los pétalos requiere energía, movilización de reservas y absorción de agua, procesos que disminuyen considerablemente cuando la temperatura se reduce. Como consecuencia, el almacenamiento en frío disminuye la velocidad respiratoria y retrasa la transición hacia estados avanzados de apertura floral, prolongando la vida útil de las flores de corte (Kader, 2002; Reid y Jiang, 2012).

La interacción significativa entre tiempo de almacenamiento y ambiente confirma que el efecto de la temperatura se vuelve más evidente conforme aumenta la duración del almacenamiento. Mientras las flores mantenidas a temperatura ambiente continuaron su desarrollo fisiológico y alcanzaron estados más avanzados de apertura, aquellas conservadas bajo refrigeración mostraron una evolución considerablemente más lenta, manteniéndose durante más tiempo en condiciones adecuadas para su comercialización. Este comportamiento coincide con lo reportado por van Doorn y Han (2011), quienes señalan que el almacenamiento a bajas temperaturas constituye una de las estrategias más eficientes para retrasar la senescencia y prolongar la vida postcosecha de las flores de corte.

El comportamiento observado en esta variable complementa los resultados obtenidos para el peso fresco y la curvatura. Los tallos que conservaron un mayor contenido de agua y presentaron menor deformación estructural fueron también aquellos que retrasaron la apertura floral, lo que evidencia que estas variables representan diferentes manifestaciones

de un mismo proceso fisiológico asociado con la conservación del equilibrio hídrico y la reducción del metabolismo durante la postcosecha.

En conjunto, los resultados obtenidos respaldan parcialmente la hipótesis planteada, ya que la calidad postcosecha del tulipán cultivar 'Orange Juice' estuvo determinada principalmente por el tiempo de almacenamiento y las condiciones de conservación. Aunque se esperaba que los tratamientos de rehidratación ejercieran un efecto más amplio sobre las variables evaluadas, su influencia se limitó principalmente al crecimiento longitudinal del tallo y dependió de su interacción con el estado fisiológico adquirido durante el almacenamiento. La refrigeración permitió conservar un mayor peso fresco, limitar parcialmente la curvatura y retrasar la apertura del botón floral, confirmando que el mantenimiento de la cadena de frío constituye la estrategia de manejo más efectiva para preservar la calidad fisiológica, ornamental y comercial de los tallos florales durante la postcosecha.

Conclusión

La calidad postcosecha del tulipán (*Tulipa spp.*) cultivar *Orange Juice* estuvo determinada principalmente por el tiempo de almacenamiento y las condiciones de conservación, lo que demuestra que el manejo de la temperatura constituye el factor de mayor influencia sobre el comportamiento fisiológico de los tallos florales durante la postcosecha.

Las soluciones de rehidratación modificaron únicamente respuestas fisiológicas específicas, particularmente la elongación del tallo, mientras que variables estrechamente relacionadas con la calidad comercial, como el peso fresco, la curvatura y el estado del botón floral, dependieron principalmente de las condiciones de conservación y del tiempo de almacenamiento. Estos resultados evidencian que la eficacia de los tratamientos de rehidratación está condicionada por el estado fisiológico que adquieren los tallos durante el almacenamiento.

En conjunto, este estudio demuestra que la conservación de la calidad postcosecha del tulipán responde a la interacción entre el estado fisiológico del material vegetal y las condiciones de manejo posteriores a la cosecha, siendo el mantenimiento de la cadena de frío la estrategia más efectiva para preservar la calidad fisiológica, ornamental y comercial de los tallos florales. Estos hallazgos aportan información útil para optimizar el manejo postcosecha del tulipán destinado a flor de corte y proporcionan una base para el desarrollo y evaluación de futuras estrategias de conservación.

Literatura citada

Libros

Kader, A. A. (Ed.). (2002). *Postharvest technology of horticultural crops* (3rd ed.). University of California, Agriculture and Natural Resources.

Kamenetsky, R., & Okubo, H. (Eds.). (2012). *Ornamental geophytes: From basic science to sustainable production*. CRC Press. https://doi.org/10.1201/b12881

Reid, M. S., & Jiang, C. Z. (2012). Postharvest biology and technology of cut flowers and potted plants. En D. Pimentel (Ed.), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (pp. 375–398). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_687

Revistas

Ichimura, K., & Hisamatsu, T. (1999). Effects of continuous treatment with sucrose on the vase life, soluble carbohydrate concentrations, and ethylene production of cut snapdragon flowers. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 68*(1), 61–66. https://doi.org/10.2503/jjshs.68.61

Pun, U. K., & Ichimura, K. (2003). Role of sugars in senescence and biosynthesis of ethylene in cut flowers. *Japan Agricultural Research Quarterly, 37*(4), 219–224. https://doi.org/10.6090/jarq.37.219

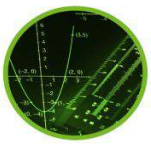
Sarhan, A. M. Z., Heikal, A. A. M., Saadawy, F. M., Noor El-Deen, T. M., & Abd Elkareem, K. M. (2023). Effect of some chemical and natural preservative solutions on vase life, water relations and some chemical composition of *Dianthus caryophyllus* L. cut flowers. *Advances in Horticultural Science, 37*(3), 255–269. https://doi.org/10.36253/ahsc-14247

van Doorn, W. G., & Han, S. S. (2011). Postharvest quality of cut flowers and potted plants. *Horticultural Reviews, 40*, 1–85.

van Doorn, W. G., & Woltering, E. J. (2011). A treatment to improve the vase life of cut tulips: Effects on tepal senescence, tepal abscission, leaf yellowing and stem elongation. *Journal of Experimental Botany, 62*(13), 4533–4553. https://doi.org/10.1093/jxb/err107

TEMÁTICA 11. PRODUCCIÓN ANIMAL, ACUACULTURA Y SANIDAD ANIMAL

Áreas Temáticas



Ciencia, Ingeniería, Educación y Tecnologías para la Agricultura Sostenible



Economía Agrícola, Desarrollo Territorial, Tecnología e Innovación Social



Ciencias Biológicas y Agronómicas



Nuevas perspectivas en Química: de lo molecular a lo global



Desarrollo rural, agroecología y cambio climático

Degradación *in vitro* de dos dietas para finalización de becerros con maíz rolado a diferente presión

Luis Enrique Montalvo Madrigal[71], Giselle Patricia Triana Valencia, Rey Aureliano Márquez Caudillo, Juan Manuel Pinos Rodríguez

Resumen

El procesamiento térmico y mecánico del maíz mejora la disponibilidad del almidón para la fermentación ruminal, pero la presión aplicada durante el rolado incide en el gasto energético y el desgaste del equipo. En dietas de finalización, ajustar esa presión es clave para equilibrar digestibilidad y costo. Este trabajo evaluó la degradación in vitro de materia seca y la tasa de degradación de dos dietas de finalización para becerros, formuladas con maíz rolado a dos densidades de hojuela (23 y 27 libras por bushel), usadas en un rancho de engorda de Veracruz. La digestibilidad se determinó con la primera fase de la técnica de Tilley y Terry, con líquido ruminal de un becerro alimentado con las dietas experimentales, mezclado con saliva de McDougall en dilución 4:1 e incubado a 39 °C durante 0, 3, 6, 9, 12, 24, 48 y 72 horas. Los datos se analizaron en un diseño completamente al azar con el procedimiento de Modelos Lineales Generales; la cinética de degradación se estimó con el modelo de Mertens y Loften. No hubo diferencias entre dietas en la degradacion de materia seca durante las primeras 12 horas ($p>0.05$). Desde las 24 horas, la dieta a 27 libras mostró mayor degradacion de materia seca y mayor tasa de degradación que la de 23 libras ($p<0.05$), con 86.33% frente a 81.14% a las 72 horas. Aumentar la presión de rolado mejora la digestibilidad ruminal del maíz, pero esa mejora no justifica el mayor gasto energético ni el desgaste adicional del equipo.

Palabras clave: maíz rolado, digestibilidad in vitro, densidad de hojuela, becerros en finalización, cinética ruminal.

Abstract

Thermal and mechanical processing of corn improves starch availability for ruminal fermentation, but the pressure applied during roller-milling affects both energy cost and equipment wear. In finishing diets, setting that pressure correctly is key to balancing digestibility and production cost. This study evaluated in vitro dry matter disappearance and degradation rate of two finishing diets for calves formulated with corn rolled at two flake

[71] Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Veracruzana, Región Veracruz, Veracruz, México. Autor de correspondencia: jpinos@uv.mx, zS24008725@estudiantes.uv.mx, zS24008679@estudiantes.uv.mx, zS19023083@estudiantes.uv.mx

densities, twenty-three and twenty-seven pounds per bushel, used on a feedlot in Veracruz. Digestibility was determined with the first stage of the Tilley and Terry technique, using ruminal fluid from a calf fed the experimental diets, mixed with McDougall saliva at a 4:1 dilution and incubated at 39 °C for 0, 3, 6, 9, 12, 24, 48, and 72 hours. Data were analyzed under a completely randomized design using the General Linear Models procedure, and degradation kinetics were estimated with the Mertens and Loften model. No differences between diets were found in dry matter disappearance during the first 12 hours of incubation ($p>0.05$). From 24 hours onward, the diet with corn rolled at 27 pounds showed greater dry matter disappearance and a higher degradation rate than the 23-pound diet ($p<0.05$), reaching 86.33% versus 81.14% at 72 hours. Increasing rolling pressure does improve ruminal digestibility of corn, but the magnitude of that improvement does not appear to justify, on its own, the higher energy cost and additional equipment wear.

Keywords: rolled corn, in vitro digestibility, flake density, finishing calves, ruminal kinetics.

Introducción

Más del 60% de la energía que un rumiante utiliza en su metabolismo proviene de la fermentación microbiana que ocurre en el rumen, donde se generan ácidos grasos volátiles a partir de los carbohidratos de la dieta. Entre el 60 y el 80% de la proteína que finalmente se absorbe en el duodeno llega, además, en forma de proteína microbiana. La producción animal depende, en buena medida, de qué tan bien se digiere el alimento en ese ambiente (Nemocón et al., 2020). En la engorda de ganado el objetivo es simple de enunciar y difícil de lograr: producir la mayor cantidad de kilos de carne por animal en el menor tiempo posible (Livas, 2016). Las dietas altas en grano son la herramienta principal para conseguirlo.

El maíz aporta esa energía en forma de almidón, un polímero de glucosa que se presenta como amilosa y amilopectina en proporciones variables según la especie del grano (Cervantes, 2019). Su digestión está limitada, sin embargo, por una matriz proteica que encapsula los gránulos de almidón. El rolado busca romper justamente esa matriz: mediante vapor y presión mecánica, el proceso gelatiniza el almidón y facilita su acceso a las bacterias ruminales (FEDEGAN, 2019). La fuerza aplicada en los rodillos determina el grosor final de la hojuela y, con ello, la superficie de contacto disponible para la fermentación. No toda presión adicional se traduce en un beneficio proporcional. Estudios recientes en ganado de engorda muestran que incrementar la densidad de la hojuela puede reducir la reactividad enzimática del almidón y el valor energético neto del maíz sin modificar la ganancia diaria de peso (Gutiérrez et al., 2018), y que ese mismo aumento de densidad disminuye la disponibilidad enzimática del almidón durante la fermentación in vitro (Trotta et al., 2024).

En México, la mayoría de los ranchos de engorda ajustan la presión de rolado de manera empírica, sin comparar sistemáticamente su efecto sobre la digestibilidad frente al costo energético y al desgaste de equipo que implica trabajar a mayor presión. Se planteó como hipótesis que una mayor presión de rolado incrementaría la disponibilidad de energía del maíz lo suficiente como para justificar ese gasto adicional. Para probarlo, el objetivo de este trabajo fue determinar la degradación in vitro de materia seca y la tasa de degradación de dos dietas de finalización para becerros elaboradas con maíz rolado a 23 y 27 libras por bushel, y comparar sus cinéticas de digestión.

Materiales y métodos

Localización

El estudio se realizó en el rancho Torreón del Molino, de la Universidad Veracruzana, ubicado paralelo a la carretera Veracruz-Xalapa a la altura del kilómetro 14.5, al noreste de la congregación de Tejería, en el municipio de Veracruz. El sitio se localiza en el paralelo 19°10′ de latitud norte y el meridiano 96°10′ de longitud oeste, a 15 metros sobre el nivel del mar.

Dietas experimentales

Se evaluaron dos dietas utilizadas en un rancho de engorda comercial, formuladas para cubrir los requerimientos nutricionales de becerros de 200±20 kg de peso vivo conforme a las tablas del NRC (2001). Ambas dietas compartían los mismos ingredientes; la diferencia entre ellas fue la densidad de la hojuela del maíz rolado, expresada en libras por bushel (Cuadro 1). Se determinó su contenido de materia seca, proteína cruda, almidón, cenizas, nutrientes digestibles totales, fibra detergente ácido y fibra detergente neutro (Cuadro 2).

Cuadro 1. Ingredientes de las dietas experimentales

Ingrediente	23 libras (kg)	%	27 libras (kg)	%
Maíz rolado	6255	69.5	6255	69.5
Barredura de maíz	270	3.0	270	3.0
Minerales	225	2.5	225	2.5
DDG	540	6.0	540	6.0
Pasta de soya	540	6.0	540	6.0
Alten-60	360	4.0	360	4.0
Paca de maíz	810	9.0	810	9.0

Cuadro 2. Composición química de las dietas experimentales

Componente (%)	23 libras	27 libras
Materia seca	82.3	79.3
Proteína cruda	12.8	16.7
Almidón	50.6	48.7
Cenizas	5.39	6.25
Nutrientes digestibles totales	82.4	81.8
Fibra detergente ácido	9.6	8.1
Fibra detergente neutro	19.9	17.5

Fuente: elaboración propia con datos de campo.

Digestibilidad in vitro de materia seca

La degradación in vitro se determinó con la primera fase de la técnica de Tilley y Terry (1963). El líquido ruminal se obtuvo de un becerro canulado alimentado con las dietas experimentales; una vez extraído, se mezcló con saliva de McDougall ajustada a pH 7 y 39 °C, en una dilución de 4:1 (saliva: líquido ruminal). De esta mezcla se colocaron 50 ml en tubos con tapón provisto de aguja hipodérmica, cada uno con 0.5 g de la dieta correspondiente, y se gasearon con CO2 antes de sellarlos.

Los tubos se incubaron a 39 °C durante 0, 3, 6, 9, 12, 24, 48 y 72 horas. Al término de cada tiempo, la fermentación se detuvo por enfriamiento y congelación a -4 °C. Posteriormente se descongelaron a temperatura ambiente, se filtraron con bomba de vacío y papel filtro Whatman, y se secaron en estufa de aire forzado a 50 °C hasta peso constante, para después pesarlos y cuantificar la degradación de materia seca. Se incluyeron tubos en blanco, sin dieta, como factor de corrección. El experimento se corrió dos veces con una semana de diferencia, con tres tubos por incubación y por dieta.

Diseño experimental y análisis estadístico

Las variables se analizaron bajo un diseño completamente al azar. El análisis de varianza y la comparación de medias se realizaron con el procedimiento de Modelos Lineales Generales (GLM) y una prueba de t, utilizando el paquete estadístico SAS. El modelo estadístico empleado fue:

$$Yij = \mu + \tau i + \varepsilon ij \quad (1)$$

donde Yij es la variable respuesta en el tratamiento i, repetición j; μ es la media general; τi es el efecto del tratamiento, y εij es el error aleatorio, $\varepsilon ij \sim N(0, \sigma^2)$.

Los componentes de la cinética ruminal, tasa de degradación y fase de latencia, se calcularon mediante un análisis de regresión simple siguiendo el modelo de Mertens y Loften (1980):

$$Y = a + bx \quad (2)$$

donde Y es la variable dependiente, a es la ordenada al origen, b es la pendiente de la recta y x es la degradacion del sustrato en el tiempo; la tasa de degradación corresponde a la pendiente dividida entre el tiempo.

Resultados y discusión

La degradación de materia seca fue similar entre dietas durante las primeras 12 horas de incubación (P>0.05, Cuadro 3). A partir de las 24 horas la dieta con maíz rolado a 27 fue mas degradable que la de 23 libras (P<0.05), llegando a 86.33% frente a 81.14% a las 72 horas.

Cuadro 3. Degradación in vitro de materia seca por tiempo de incubación (%)

Hora de incubación	23 libras	27 libras	EEM
0	9.35	9.61	0.13
3	22.32	22.60	0.12
6	30.91	30.47	0.14
9	40.37	40.71	0.67
12	65.76	64.03	0.70
24	73.39 b	77.36 a	0.95
48	75.51 b	80.92 a	0.74
72	81.14 b	86.33 a	0.66
Kd (h-1)	0.80 b	0.99 a	0.02

Medias con distinta letra en la misma fila difieren significativamente (P<0.05). EEM = error estándar de la media.

Ese patrón tiene una explicación mecánica razonable. El tratamiento hidrotérmico del rolado modifica las propiedades físico-químicas del almidón al facilitar la interacción entre sus cadenas amorfas y cristalinas, y el grado de ese cambio depende de la composición del almidón, la humedad y la temperatura durante el procesamiento (Corona et al., 2006). Trabajos recientes en maíz procesado por vapor confirman que ajustar la densidad de la hojuela modifica de forma directa la disponibilidad enzimática del almidón durante la fermentación (Trotta et al., 2024), lo cual es consistente con la mayor degradación observada aquí en la dieta de mayor densidad.

Sorprende, sin embargo, que el efecto no se manifestara sino hasta las 24 horas. Una explicación posible es que en las primeras etapas de incubación la fermentación dependa más de la fracción soluble del almidón, similar en ambas dietas, y que las diferencias en la matriz proteica que aún encapsula parte del gránulo y es más degradable conforme avanza el tiempo de exposición microbiana. Desde el punto de vista productivo, aumentar la presión de rolado parecería la decisión obvia para aumentar su degradabilidad al tener más superficie de

contacto, sin embargo, mayor presión de rolado genera mayor gasto de energía y un desgaste adicional de los equipos además que estudios en ganado finalizado muestran que incrementos en la densidad de la hojuela pueden mejorar la digestibilidad sin traducirse en ganancias de peso o en beneficios económicos claros (Gutiérrez et al., 2018).

Conclusiones

El maíz rolado a mayor presión sí mejora la degradación de materia seca y la tasa de degradación ruminal a partir de las 24 horas de fermentación, comparado con una presión menor. Esa ganancia en digestibilidad es, sin embargo, moderada frente al mayor consumo energético y el desgaste de equipo que exige trabajar a mayor presión. Antes de ajustar la presión de rolado en una planta comercial conviene analizar el efecto productivo y el costo económico.

Literatura citada

Cervantes, J. (2019). Caracterización estructural de almidón resistente tipo V [Tesis, Universidad Autónoma de Querétaro]. Repositorio Institucional UAQ. https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/9291/1/FQLIN-237686.pdf

Corona, L., Owens, F. N., y Zinn, R. A. (2006). Impact of corn vitreousness and processing on site and extent of digestion by feedlot cattle. Journal of Animal Science, 84(11), 3020–3031. https://doi.org/10.2527/jas.2005-603

FEDEGAN. (2019). Los 5 métodos de procesamiento de granos para elaborar alimento bovino. Federación Colombiana de Ganaderos. Disponible en: https://www.contextoganadero.com/agricultura/los-5-metodos-de-procesamiento-de-granos-para-elaborar-alimento-bovino [Consultado el 15 de agosto de 2026].

Gutiérrez, B. H., Álvarez, E. G., Montaño, M. F., Salinas-Chavira, J., Torrentera, N. G., y Zinn, R. A. (2018). Influence of flake density and tempering on the feeding value of steam-flaked corn for feedlot cattle. Journal of Applied Animal Research, 46(1), 155–158. https://doi.org/10.1080/09712119.2017.1278699

Livas, F. (2016). Alimentación y manejo del ganado bovino de engorda. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: https://www.engormix.com/ganaderia/ganancia-peso-terneros/alimentacion-manejo-ganado-bovino_a39579/ [Consultado el 15 de agosto de 2026].

Mertens, D. R., y Loften, J. R. (1980). The effect of starch on forage fiber digestion kinetics in vitro. Journal of Dairy Science, 63(9), 1437–1446.

National Research Council [NRC]. (2001). Nutrient requirements of dairy cattle (7a ed.). National Academy Press. Disponible en: https://nap.nationalacademies.org/catalog/9825/nutrient-requirements-of-dairy-cattle-seventh-revised-edition-2001 [Consultado el 15 de agosto de 2026].

Nemocón, A., Angulo, J., Gallo, J., y Mahecha, L. (2020). Alimentación: factor estratégico durante la crianza artificial de terneros provenientes de lecherías. Agronomía Mesoamericana.

Tilley, J. M. A., y Terry, R. A. (1963). A two-stage technique for the in vitro digestion of forage crops. Journal of the British Grassland Society, 18(2), 104–111.

Trotta, R. J., Kreikemeier, K. K., y Harmon, D. L. (2024). Influence of flake density and starch retrogradation on in vitro gas production kinetics, digestibility, and ruminal fermentation characteristics of steam-flaked corn. Journal of Animal Science, 102, skae308. https://doi.org/10.1093/jas/skae308

Detección molecular por RT-PCR y factores epidemiológicos de norovirus genogrupo I en unidades de producción cunícola del Estado de México

Anahí Jiménez Ramos[72], Linda Guiliana Bautista Gómez*, Martinez Castañeda José Simón, Fonseca Coronado Salvador[73]

Resumen

La producción de conejos en México se realiza mayormente en sistemas de traspatio donde existen medidas sanitarias precarias y frecuentes trastornos digestivos que se convierten en pérdidas económicas para el sector cunícola. Los Norovirus (NoV) son reconocidos en la actualidad como agentes causantes de gastroenteritis no bacteriana y se han identificado infecciones en los conejos con enfermedad entérica. El objetivo de este estudio fue estimar la prevalencia de la infección por NoV e identificar factores asociados en unidades de producción de conejos en el Estado de México. Donde se realizó un estudio descriptivo de corte transversal en conejos de 30 a 75 días de edad que presentaban signos entéricos, muestreados en granjas de la región sureste del Estado de México entre diciembre de 2021 y mayo de 2023. Se obtuvieron muestras duodenales mediante necropsia, posteriormente se analizaron empleando la reacción en cadena de la polimerasa con transcripción inversa (RT-PCR) convencional (punto final) para detectar NoV, además también, se aplicó un cuestionario epidemiológico a los propietarios de las granjas. Como resultado se detectó a NoV en 21 de 96 muestras (22%), y todas las cepas pertenecían al genogrupo I. La infección por NoV se asoció significativamente con diarrea, la presencia de niños menores de 5 años y adultos mayores de 65 años en el hogar, la falta de filtros sanitarios, la interacción con otras especies animales y la presencia de fauna silvestre. Los datos obtenidos sugieren que el NoV del genogrupo I es un agente importante de la enfermedad entérica del conejo en la región. El hallazgo de un genogrupo relacionado con el ser humano en entornos domésticos pone de relieve la necesidad de reforzar las medidas de bioseguridad y justifica la realización de más estudios sobre la dinámica de transmisión en la interfaz hombre-animal.

Palabras clave: norovirus, conejos, enfermedad entérica, México, factores asociados.

[72] Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario UAEM Amecameca.km 2.5 carretera Ayapango- Amecameca s/n, Amecameca, C.P. 56900, Estado de México, México. [2]Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, El Cerrillo Piedras Blancas, C.P. 50295, Toluca, Estado de México, México. lgbautistaga@uaemex.mx, jsmartinezc@uaemex.mx
[73] Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Carretera Cuautitlán-Teoloyucan Km. 2.5, Col. San Sebastián Xhala, C.P. 54714, Estado de México, México. fonsecacoronado@yahoo.com.mx. * Autor de correspondencia: *lgbautistag@uaemex.mx

Abstract

Rabbit production in Mexico primarily takes place in backyard systems characterized by poor sanitary conditions and frequent digestive disorders, resulting in economic losses for the rabbit industry. Noroviruses (NoV) are currently recognized as causative agents of non-bacterial gastroenteritis, and infections have been identified in rabbits suffering from enteric disease. The objective of this study was to estimate the prevalence of NoV infection and identify associated factors in rabbit production units in the State of Mexico. A descriptive cross-sectional study wasconducted on rabbits aged 30 to 75 days exhibiting enteric signs; samples were collected from farms in the southeastern region of the State of Mexico between December 2021 and May 2023. Duodenal samples obtained via necropsy were analyzed using conventional (endpoint) reverse transcription-polymerase chain reaction (RT-PCR) to detect NoV, and an epidemiological questionnaire was administered to farm owners. NoV was detected in 21 of 96 samples (22%), and all strains belonged to genogroup I. NoV infection was significantly associated with diarrhea, the presence of children under 5 years of age and adults over 65 years of age in the household, the lack of sanitary barriers, interaction with other animal species, and the presence of wildlife. The data suggest that genogroup I NoV is a significant agent of enteric disease in rabbits in the region. The detection of a genogroup linked to humans in domestic settings highlights the need to strengthen biosecurity measures and warrants further study into transmission dynamics at the human-animal interface.

Keywords: norovirus, rabbits, enteric disease, Mexico, associated factors.

Introducción

En México la cría de conejos se practica principalmente en zonas rurales y, en la mayoría de los casos, bajo sistemas de producción familiar caracterizados por medidas sanitarias limitadas (Mendoza, 2001). Esta actividad de cría de conejos domésticos a pequeña escala proporciona proteína animal de alta calidad y puede contribuir a reducir la inseguridad alimentaria debido a sus ventajas productivas: requiere poco espacio, puede implementarse en áreas pequeñas con baja inversión y generar ingresos adicionales, mejorando así los indicadores de salud y económicos de los hogares (Bautista Hernández *et al*., 2021). En el país, existen 11,560 unidades de producción de conejos con 1,108,350 conejos domésticos; el Estado de México destaca con 3,885 unidades y 293,332 animales, seguido por Hidalgo con 1,064 unidades y 274,811 conejos (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria [SENASICA], 2020).

Los factores que afectan la producción animal se clasifican comúnmente como ambientales, de manejo sanitario y genéticos, y entre los aspectos sanitarios, las enfermedades que ocurren con mayor frecuencia en conejos son de particular importancia (Lebas *et al*., 2002). Los trastornos digestivos son las patologías más comunes en la cría de conejos, causando pérdidas económicas significativas asociadas principalmente con el retraso del crecimiento (Lebas *et al*., 2002). La diarrea es el principal signo clínico observado en las unidades de producción de conejos y representa uno de los problemas de salud más importantes que afectan tanto a humanos como a animales en proporciones similares en países industrializados y no industrializados (Blomström *et al.*, 2014). Entre los patógenos más frecuentemente asociados con la gastroenteritis no bacteriana en todo el mundo se encuentran los norovirus (NoV) (Mills *et al*., 2023).

El NoV es un virus de ARN monocatenario de sentido positivo, sin envoltura. Su genoma está organizado en tres marcos de lectura abiertos (ORF), donde ORF2 codifica la proteína principal de la cápside (VP1), y sirve como base principal para la clasificación genética del virus en distintos genogrupos y genotipos. El uso creciente de técnicas moleculares para la identificación de patógenos ha revelado una amplia diversidad de NoV, que actualmente se clasifican en 10 genogrupos y más de 40 genotipos que infectan a humanos y una amplia gama de huéspedes animales, incluidos conejos domésticos, animales de compañía y fauna silvestre (Chhabra *et al*., 2019). En los últimos años, también se ha informado de la infección por NoV en conejos, probablemente es facilitada por la similitud entre las células epiteliales intestinales de conejo y el humano, lo cual favorece el desarrollo de la enfermedad entérica en esta especie (López-Aguado *et al*., 2017; Thorne & Goodfellow, 2014). Paralelamente, la detección de genogrupos y genotipos de NoV humanos en diferentes especies animales ha generado preocupación sobre el posible papel de los animales como reservorios o huéspedes de transmisión de cepas humanas, y sobre la ocurrencia de posibles eventos de transmisión antroponótica de humanos a animales (Castro *et al*., 2015; Menon *et al*., 2013; Mesquita & Nascimento, 2012; Smiley *et al*., 2003; Villabruna *et al*., 2019; Wang *et al*., 2005).

Las unidades de producción de conejos en patios traseros a menudo implican un contacto estrecho y prolongado entre los animales y los miembros del hogar de diferentes grupos de edad, incluidos niños pequeños y personas mayores, lo que puede favorecer la transmisión bidireccional de patógenos entéricos (Bányai *et al*., 2018; Mitchell *et al*., 1999; Mladenova *et al*., 2010). En este contexto, documentar las infecciones por NoV en conejos e identificar los factores que favorecen su aparición es relevante no solo para la salud y la productividad de los conejos, sino también para comprender la posible contribución de los conejos a la epidemiología de los norovirus humanos y el riesgo de transmisión antroponótica (Villabruna *et al*., 2019). Partiendo de informes preliminares que confirmaron la presencia basal del virus

en la región, el objetivo de este estudio fue estimar la prevalencia de la infección por NoV e identificar sistemáticamente los factores epidemiológicos asociados con la infección por NoV en unidades de producción de conejos en patios traseros en el Estado de México.

Materiales y métodos

Diseño del estudio

Se realizó un estudio descriptivo, transversal, comparativo, observacional y no experimental. Para seleccionar los animales incluidos en el estudio, se utilizó una estrategia de muestreo por conveniencia no probabilístico.

Población de estudio

Un total de 96 conejos que presentaban signos entéricos (como diarrea, deshidratación, distensión abdominal, secreción mucosa o estreñimiento), de 30 a 75 días de edad, de diferentes razas y de ambos sexos, representando todos los casos disponibles que cumplían con los criterios de inclusión de las granjas seleccionadas durante el período de muestreo. Los animales fueron obtenidos de granjas de conejos ubicadas en la región sureste del Estado de México, que comprende los municipios de Valle de Chalco, Chalco, Temamatla, Cocotitlán, Tlalmanalco, Juchitepec, Tenango del Aire, Ayapango, Amecameca, Atlautla, Ozumba, Tepetlixpa y Ecatzingo. El muestreo se realizó entre diciembre de 2021 y mayo de 2023.

Los conejos con signos entéricos fueron remitidos al Laboratorio de Biotecnología, Biología Molecular y Genética del Centro Universitario UAEM Amecameca. Donde realizó un examen clínico ante mortem para identificar y diagnosticar signos específicos como diarrea, deshidratación, distensión abdominal, secreción mucosa y estreñimiento. Posteriormente, los animales fueron sacrificados de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-033-SAG/ZOO-2014. Tras el sacrificio, se recolectaron muestras de tejido duodenal para análisis virológico.

Recolección y procesamiento de muestras

Durante la necropsia, se recolectaron asépticamente secciones de duodeno de cada conejo y se colocaron en recipientes estériles. Las muestras se almacenaron a -20 °C sin solución estabilizadora hasta que se realizó la extracción de ARN y el análisis de RT-PCR.

Extracción de ARN y RT-PCR

El ARN viral se extrajo del tejido intestinal utilizando el método convencional de fenol-cloroformo con reactivo TRIzol (Invitrogen, Cat. No. 15596026), siguiendo las instrucciones

del fabricante y los principios metodológicos descritos por Chomczynski y Sacchi (1987). La integridad y concentración del ARN total extraído se evaluaron simultáneamente mediante electroforesis en gel de agarosa. Se corrieron alícuotas de muestra en un gel de agarosa al 1.2% (p/v) teñido con bromuro de etidio, donde la integridad del ARN se verificó visualmente por la presencia de bandas nítidas correspondientes a los ARN ribosómicos. Para determinar la concentración semicuantitativamente, se realizó una comparación densitométrica de las intensidades de las bandas de la muestra con un marcador de peso molecular con masas estandarizadas conocidas (Gene Ruler DNA Ladder) corrido en paralelo. Este enfoque aseguró el uso exclusivo de plantillas de ARN intactas para la posterior síntesis de ADNc. La síntesis de ADN complementario (ADNc) se llevó a cabo utilizando el sistema de transcripción inversa ImProm-II™ (Promega), siguiendo las recomendaciones del fabricante.

Para la identificación molecular del NoV, se realizó una PCR convencional dirigida a la región de la cápside utilizando los cebadores específicos del genogrupo descritos por Kojima et al. (2002). Para el genogrupo I (GI), se utilizaron los cebadores G1SKF (5'-CTGCCCGAATTYGTAAATGA-3') y G1SKR (5'-CCAACCCARCCATTRTACA-3'). Adicionalmente, se realizó un cribado paralelo para el genogrupo II (GII) utilizando los cebadores G2SKF (5'-CNTGGGAGGGCGATCGCAA-3') y G2SKR (5'-CCRCCNGCATRHCCRTTRTACAT-3'). Para ambos conjuntos de cebadores, los fragmentos de amplificación esperados fueron de aproximadamente 300 pares de bases. Las condiciones de la PCR consistieron en una desnaturalización inicial a 94 °C durante 5 minutos, seguida de 40 ciclos de desnaturalización a 94 °C durante 30 segundos, hibridación a 50 °C durante 30 segundos y extensión a 72 °C durante 40 segundos, con una extensión final a 72 °C durante 5 minutos. Los productos de la PCR se separaron en geles de agarosa al 3% mediante electroforesis a 100 V durante 30 minutos, se tiñeron con bromuro de etidio y se visualizaron bajo luz ultravioleta con un transiluminador.

Recopilación de datos epidemiológicos

La información epidemiológica se obtuvo mediante entrevistas con los propietarios de las granjas de conejos, utilizando un cuestionario estructurado para registrar variables de interés relacionadas con signos clínicos, prácticas de manejo, presencia de otras especies animales y características del hogar (Varga, 2013). Los datos del cuestionario se introdujeron en una base de datos electrónica para su posterior análisis.

Análisis estadístico

Se realizó un análisis descriptivo utilizando Microsoft Excel. Posteriormente, se llevaron a cabo análisis estadísticos inferenciales con el software Stata® (StataCorp, College Station, TX, EE. UU.) para evaluar la asociación entre la infección por NoV y las variables clínicas y de manejo registradas. Las asociaciones entre la infección por NoV y los posibles factores de riesgo se evaluaron mediante la prueba de chi-cuadrado de Pearson. En los casos en que la frecuencia esperada en alguna celda fue menor que 5, se empleó la prueba exacta de Fisher para garantizar la validez estadística. Las diferencias se consideraron estadísticamente significativas con valores de $p \leq 0.05$.

Resultados

Prevalencia y distribución de genogrupos

Se detectó ARN de norovirus en 21 de las 96 muestras duodenales analizadas, lo que resultó en una prevalencia general del 22% de infección por NoV entre los conejos con signos entéricos. Las 21 muestras positivas se amplificaron exclusivamente con los cebadores específicos para el genogrupo GI, clasificándolas dentro del genogrupo I. No se obtuvieron amplificaciones con los cebadores específicos para el genogrupo GII. Estos hallazgos indican la circulación de un único genogrupo (GI) en la población estudiada.

Presentación clínica

La Tabla 1 resume los signos clínicos y los factores de manejo/exposición asociados con la infección por NoV. Entre los signos clínicos evaluados, la diarrea fue la única variable significativamente asociada con la infección por NoV.

Tabla 1. Variables asociadas con la infección por NoV en conejos con signos entéricos.

Variable	NoV- No	NoV- Sí	NoV+ No	NoV+ Sí	Prueba	Valor p
Signos clínicos						
Diarrea	14 (18.4%)	62 (81.6%)	1 (4.8%)	20 (95.2%)	Chi-cuadrado	0.038
Deshidratación	17 (22.4%)	59 (77.6%)	4 (19.0%)	17 (81.0%)	Chi-cuadrado	0.471
Distensión abdominal	31 (40.8%)	45 (59.2%)	9 (42.9%)	12 (57.1%)	Chi-cuadrado	0.949
Secreción mucoide	65 (85.5%)	11 (14.5%)	21 (100.0%)	0 (0.0%)	Chi-cuadrado	0.087

Estreñimiento	69 (90.8%)	7 (9.2%)	21 (100.0%)	0 (0.0%)	Chi-cuadrado	0.159
Membranas mucosas isquémicas	53 (69.7%)	23 (30.3%)	14 (66.7%)	7 (33.3%)	Fisher	0.535
Factores de manejo y exposición						
Presencia de niños < 5 años	53 (69.7%)	23 (30.3%)	16 (76.2%)	5 (23.8%)	Chi-cuadrado	0.049
Presencia de adultos > 65 años	53 (69.7%)	23 (30.3%)	16 (76.2%)	5 (23.8%)	Chi-cuadrado	0.034
Falta de filtros sanitarios	30 (39.5%)	46 (60.5%)	11 (52.4%)	10 (47.6%)	Chi-cuadrado	0.021
Falta de medidas de cuarentena	20 (26.3%)	56 (73.7%)	5 (23.8%)	16 (76.2%)	Chi-cuadrado	0.085
Interacción con otras especies animales	9 (11.8%)	67 (88.2%)	2 (9.5%)	19 (90.5%)	Fisher	0.035
Presencia de fauna silvestre	4 (5.3%)	72 (94.7%)	0 (0.0%)	21 (100.0%)	Fisher	0.045
Producción en traspatio	36 (48.0%)	39 (52.0%)	8 (38.1%)	13 (61.9%)	Chi-cuadrado	0.067
Tipo de alimentación (comercial/forraje)	63 (84.0%)	12 (16.0%)	20 (95.2%)	1 (4.8%)	Chi-cuadrado	0.167
Consumo de agua de pozo	38 (50.7%)	37 (49.3%)	9 (42.9%)	12 (57.1%)	Chi-cuadrado	0.154

Nota. Los valores se presentan como n (%). Los porcentajes se calcularon dentro de cada grupo de NoV. Se utilizó la prueba de chi-cuadrado cuando los recuentos esperados de celdas eran adecuados; se utilizó la prueba exacta de Fisher cuando los recuentos esperados eran <5.

En cuanto a las características del hogar, la presencia de niños menores de 5 años y adultos mayores de 65 años en el hogar se asoció significativamente con la infección por NoV en conejos ($p = 0.049$ y $p = 0.034$, respectivamente).

Entre las variables de manejo, la falta de filtros sanitarios, la interacción con otras especies animales y la presencia de fauna silvestre también se asociaron significativamente con la infección por NoV en conejos ($p = 0.021$, $p = 0.035$ y $p = 0.045$, respectivamente). Por el

contrario, variables como la producción en corrales familiares, el tipo de alimentación (comercial/forraje), la falta de cuarentena y el consumo de agua de pozo no mostraron asociaciones estadísticamente significativas ($p > 0.05$).

Discusión

La prevalencia general del 22% de infección por NoV y la detección exclusiva del genogrupo I en conejos con signos entéricos indican que norovirus del genogrupo I circulan en unidades de producción de conejos de traspatio en el Estado de México y pueden tener relevancia epidemiológica en la enfermedad entérica de los conejos (Chhabra *et al*., 2019; López-Aguado *et al*., 2017). Este hallazgo concuerda con informes previos de NoV en diferentes especies animales, donde se han identificado genogrupos y genotipos relacionados con cepas humanas (Villabruna *et al*., 2019; Wang *et al*., 2005; Wolf *et al*., 2009).

Si bien factores como la edad, la raza, el sexo y la dieta pueden influir en los síntomas entéricos, todos los conejos de este estudio fueron seleccionados dentro de un rango de edad consistente (30-75 días) para estandarizar la evaluación clínica. La asociación significativa entre la infección por NoV y la diarrea observada en este estudio concuerda con las descripciones de la enfermedad entérica asociada a norovirus en otros animales de granja, en los que la infección se ha relacionado con diarrea acuosa y lesiones intestinales (Cho *et al*., 2013; Wolf *et al*., 2009). Estos resultados respaldan el papel del NoV como un enteropatógeno capaz de contribuir sustancialmente a los síndromes entéricos clínicos en conejos, además de otras causas conocidas de trastornos digestivos que afectan el crecimiento y la productividad (Lebas *et al*., 2002).

La asociación entre la infección por norovirus y la presencia de niños menores de 5 años y adultos mayores de 65 años en el hogar es un hallazgo de interés. Si bien este estudio no evaluó la excreción viral en humanos, la literatura científica reconoce que estos grupos de edad son altamente susceptibles a la infección por norovirus. En sistemas domésticos donde los conejos se mantienen cerca de las áreas habitables, esta composición demográfica podría influir en la carga viral ambiental, aunque se requieren estudios adicionales que realicen un seguimiento simultáneo de las cepas humanas y animales para confirmar esta dinámica (Bányai *et al*., 2018; Mitchell *et al*., 1999; Mladenova *et al*., 2010). En los sistemas de producción doméstica, los conejos suelen mantenerse cerca de las zonas de vivienda y son manipulados por diferentes miembros de la familia, lo que puede facilitar la introducción y el mantenimiento de cepas de norovirus humanos en la población animal (Villabruna *et al*., 2019). Este escenario sugiere que los miembros del hogar podrían ser una fuente de infección para los conejos, especialmente cuando las medidas de bioseguridad son limitadas.

De igual manera, las asociaciones significativas con la falta de filtros sanitarios, la interacción con otras especies animales y la presencia de fauna silvestre resaltan la importancia del manejo y los factores ambientales en la epidemiología norovirus en conejos. La ausencia de filtros sanitarios refleja deficiencias en la bioseguridad básica, como ropa y calzado específicos, instalaciones para el lavado de manos o acceso controlado a las instalaciones para animales, lo que puede favorecer la introducción y propagación de patógenos entéricos (Varga, 2013). La interacción con otras especies domésticas y el contacto con fauna silvestre, incluidos roedores, murciélagos y aves, aumenta la probabilidad de exposición a una amplia diversidad de patógenos, algunos de los cuales han sido implicados como reservorios o huéspedes de transmisión de norovirus (Hu *et al*., 2017; Villabruna *et al*., 2019).

También es importante considerar las limitaciones económicas inherentes a los sistemas de producción de traspatio. Para estos productores, el costo de la atención veterinaria y el tratamiento médico para conejos individuales que presentan signos clínicos graves a menudo supera el valor económico del animal, lo que hace que las intervenciones terapéuticas sean financieramente inviables. Nuestras observaciones de campo en estas unidades de producción sugieren que los productores frecuentemente optan por estrategias de manejo que no implican tratamiento, priorizando la prevención y el sacrificio selectivo sobre los costosos esfuerzos curativos.

Desde la perspectiva de Una Salud, la detección de un genogrupo I asociado a humanos en conejos, junto con los factores asociados al hogar y al manejo identificados, sugiere posibles vías de transmisión de humanos a animales (Castro *et al*., 2015; Menon *et al*., 2013; Mesquita & Nascimento, 2012; Smith *et al*., 2012). Si bien este estudio no incluyó una comparación molecular de cepas de conejos y humanos, la presencia de norovirus del genogrupo I en conejos que viven en contacto cercano con personas sugiere que los conejos pueden actuar como huéspedes incidentales de norovirus humanos y potencialmente contribuir a la circulación viral ambiental en hogares y comunidades rurales (Bányai *et al*., 2018; Villabruna *et al*., 2019).

Los estudios futuros deberían incorporar la caracterización molecular de las cepas de norovirus de conejo y humano, así como diseños longitudinales, para aclarar la direccionalidad y la frecuencia de los eventos de transmisión entre humanos y conejos y definir con mayor precisión el papel de los conejos en la epidemiología de norovirus en la interfaz humano-animal (Hu *et al*., 2017; Mills *et al*., 2023). Se recomienda reforzar las medidas de bioseguridad en las unidades de producción de conejos domésticos, mejorar las prácticas de higiene y limitar el contacto incontrolado entre conejos, otras especies animales

y miembros susceptibles del hogar para mitigar el riesgo de infección por norovirus y la posible transmisión antroponótica (Varga, 2013; Villabruna *et al*., 2019).

Si bien este estudio utilizó una estrategia de muestreo por conveniencia no probabilística, los resultados proporcionan una base fundamental para la presencia y la relevancia epidemiológica de norovirus en esta región.

Conclusiones

Este estudio confirma la circulación norovirus del genogrupo I en conejos con trastornos digestivos provenientes de unidades de producción familiar en el Estado de México, resaltando su importancia como patógeno entérico en la cunicultura regional. La infección se asoció significativamente con diarrea, la presencia de grupos de edad humana susceptibles en el hogar, la falta de filtros sanitarios, la interacción con otras especies animales y la presencia de fauna silvestre. Estos factores sugieren que las variables ambientales y de manejo son relevantes en la epidemiología de norovirus en la producción cunícola familiar.

Literatura citada

Bányai, K., Estes, M. K., Martella, V., & Parashar, U. D. (2018). Viral gastroenteritis. *The Lancet*, *392*(10148), 175–186. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31128-0

Bautista Hernández, M. Á., Escobar Salazar, L. E., & Gómez Soto, J. G. (2021). *Cunicultura: una alternativa en la seguridad alimentaria en zonas periurbanas de México*. Universidad Nacional Autónoma de México; Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional. http://ru.iiec.unam.mx/5498/

Blomström, A. L., Ley, C., & Jacobson, M. (2014). Astrovirus as a possible cause of congenital tremor type AII in piglets? *Acta Veterinaria Scandinavica*, *56*(1), Artículo 4. https://doi.org/10.1186/1751-0147-56-4

Castro, T. X., Alfieri, A. F., Leite, J. P. G., & Alfieri, A. A. (2015). Detection and molecular characterization of canine norovirus in diarrheic dogs from Brazil. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, *27*(3), 381–385. https://doi.org/10.1177/1040638715577044

Chhabra, P., De Graaf, M., Parra, G. I., Chan, M. C., Green, K., Martella, V., Wang, Q., White, P. A., Katayama, K., Vennema, H., Koopmans, M. P. G., & Vinjé, J. (2019). Updated classification of norovirus genogroups and genotypes. *Journal of General Virology*, *100*(10), 1393–1406. https://doi.org/10.1099/jgv.0.001318

Cho, Y. B., Moon, S. S., Kim, H. J., Park, S. J., & Choi, I. S. (2013). Detection of norovirus in piglets with diarrhea in Korea. *Veterinary Microbiology*, *165*(3–4), 448–452. https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2013.04.008

Chomczynski, P., & Sacchi, N. (1987). Single-step method of RNA isolation by acid guanidinium thiocyanate-phenol-chloroform extraction. *Analytical Biochemistry*, *162*(1), 156–159. https://doi.org/10.1016/0003-2697(87)90021-2

Hu, D., Zhu, C., Wang, Y., Ai, L., Yang, L., Ye, F., Li, J., Briese, T., & Zhang, S. (2017). Virome analysis for identification of novel mammalian viruses in bats from Southeast China. *Scientific Reports*, *7*(1), Artículo 10917. https://doi.org/10.1038/s41598-017-11384-w

Kojima, S., Kageyama, S., Fukushi, S., Hoshino, K., Shinohara, M., Uchida, K., Natori, K., Takeda, N., & Kiso, Z. (2002). Genogroup-specific PCR primers for detection of noroviruses. *Journal of Virological Methods*, *100*(1–2), 107–114. https://doi.org/10.1016/s0166-0934(01)00404-9

Lebas, F., Rochabeaut, H., Gidenne, T., & Licois, D. (2002). La maîtrise de l'entérocolite progresse. *Cuniculture*, *29*(2), 81–84.

López-Aguado, A. G., Bautista, G. L. G., Martínez, C. J. S., & Salvador, F. C. (2017). *Diagnóstico molecular de Norovirus y Astrovirus en conejos de la zona sur-oriente del Estado de México* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del Estado de México]. Repositorio Institucional UAEMex. http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/67847

Mendoza, B. V. (2001). Situación de la cunicultura en México. *Boletín de Cunicultura*, *117*, 60–68.

Menon, V. K., George, S., Shanti, A. A., Saravanabavan, A., Samuel, P., Ramani, S., Kang, G., & Iturriza-Gómara, M. (2013). Exposure to human and bovine noroviruses in a birth cohort in southern India from 2002 to 2006. *Journal of Clinical Microbiology*, *51*(7), 2391–2395. https://doi.org/10.1128/JCM.01015-13

Mesquita, J. R., & Nascimento, M. S. J. (2012). Gastroenteritis outbreak associated with faecal shedding of canine norovirus in a Portuguese kennel following introduction of imported dogs from Russia. *Transboundary and Emerging Diseases*, *59*(5), 456–459. https://doi.org/10.1111/j.1865-1682.2011.01284.x

Mills, J. T., Minogue, S. C., Snowden, J. S., Arden, W. K. C., Rowlands, D. J., Stonehouse, N. J., & Harris, M. (2023). *Amino acid substitutions in norovirus VP1 dictate cell tropism via an attachment process dependent on membrane mobility* [Preprint]. bioRxiv. https://doi.org/10.1101/2023.02.17.528071

Mitchell, D. K., Matson, D. O., Cubitt, W. D., Jackson, L. J., Willcocks, M. M., Pickering, L. K., & Schultz-Cherry, S. (1999). Prevalence of antibodies to astrovirus types 1 and 3 in children and adolescents in Norfolk, Virginia. *The Pediatric Infectious Disease Journal*, *18*(3), 249–254. https://doi.org/10.1097/00006454-199903000-00008

Mladenova, Z., Korsun, N., Geonova, T., & Iturriza-Gómara, M. (2010). Molecular epidemiology of rotaviruses in Bulgaria: annual shift of the predominant genotype. *European Journal of Clinical Microbiology & Infectious Diseases*, *29*(5), 555–562. https://doi.org/10.1007/s10096-010-0895-1

Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (2020). *Acciones conjuntas para proteger la cunicultura*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. https://www.gob.mx/senasica/articulos/acciones-conjuntas-para-proteger-la-cunicultura

Smiley, J. R., Hoet, A. E., Traven, M., Tsunemitsu, H., & Saif, L. J. (2003). Reverse transcription-PCR assays for detection of bovine enteric caliciviruses (BEC) and analysis of the genetic relationships among BEC and human caliciviruses. *Journal of Clinical Microbiology*, *41*(7), 3089–3099. https://doi.org/10.1128/JCM.41.7.3089-3099.2003

Smith, D. B., McFadden, N., Blundell, R. J., Meredith, A., & Simmonds, P. (2012). Diversity of murine norovirus in wild-rodent populations: species-specific associations suggest an ancient divergence. *Journal of General Virology*, *93*(2), 259–266. https://doi.org/10.1099/vir.0.036392-0

Thorne, L. G., & Goodfellow, I. G. (2014). Norovirus gene expression and replication. *Journal of General Virology*, *95*(2), 278–291. https://doi.org/10.1099/vir.0.059634-0

Varga, M. (2013). *Textbook of rabbit medicine* (2.ª ed.). Butterworth-Heinemann.

Villabruna, N., Koopmans, M., & De Graaf, M. (2019). Animals as reservoir for human norovirus. *Viruses*, *11*(5), Artículo 478. https://doi.org/10.3390/v11050478

Wang, Q. H., Myung, G. H., Cheetham, S., Souza, M., Funk, J. A., & Saif, L. J. (2005). Porcine noroviruses related to human noroviruses. *Emerging Infectious Diseases*, *11*(12), 1874–1881. https://doi.org/10.3201/eid1112.050485

Wolf, S., Williamson, W., Hewitt, J., Lin, S., Rivera-Aban, M., Ball, A., Scholes, P., & Greening, G. E. (2009). Molecular detection of norovirus in sheep and pigs in New Zealand farms. *Veterinary Microbiology*, *133*(1–2), 184–189. https://doi.org/10.1016/j.vetmic.2008.06.019

Evaluación del indicador cost-price squeeze como herramienta diagnóstica en tilapia cultivada

Luna-Mora Ariana, Alcantar-Vázquez Juan Pablo, Kido-Cruz Ma. Teresa[74]

Resumen

El incremento sostenido de los costos de producción y la volatilidad del precio de venta representan uno de los principales riesgos para la rentabilidad de la acuicultura de tilapia. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del *cost-price squeeze* como herramienta diagnóstica para analizar el deterioro de los márgenes económicos en unidades de producción de tilapia cultivada en San Pedro Ixcatlán, Oaxaca. Se realizó una investigación con enfoque cuantitativo y alcance descriptivo. La información se obtuvo mediante la aplicación de 96 encuestas a productores y la construcción de una base histórica de costos y precios correspondiente al periodo 2020–2026. Se calcularon costos totales, costos medios e índices de precios y costos con año base 2020 = 100, a partir de los cuales se estimaron la brecha costo-precio y los términos de intercambio. Los resultados muestran que el alimento balanceado, los alevines y los insumos sanitarios constituyen los principales componentes del costo de producción, destacando el alimento de engorda por presentar el mayor incremento durante el periodo analizado. En 2025 y 2026 el índice fue inferior a 100, evidenciando que el crecimiento de los costos superó al del precio del producto. Se concluye que el análisis mediante índices de costos, precios y términos de intercambio constituye una herramienta útil para identificar oportunamente el fenómeno cost-price squeeze y evaluar la vulnerabilidad económica de las unidades acuícolas.

Palabras clave: *Oreochromis niloticus*, rentabilidad, costos de producción, términos de intercambio, acuicultura.

Abstract

The sustained increase in production costs and the volatility of the selling price represent one of the main risks to the profitability of tilapia aquaculture. The objective of this study was to evaluate the effect of the cost-price squeeze as a diagnostic tool to analyze the deterioration of economic margins in tilapia production units in San Pedro Ixcatlán, Oaxaca. A quantitative, descriptive study was conducted. Data was obtained through 96

[74] Universidad del Papaloapan, Av. Ferrocarril s/n, Loma Bonita, Oaxaca, terekido@hotmail.com, al3927510@gmail.com, jupasoul@hotmail.com

surveys of producers and the construction of a historical database of costs and prices for the period 2020–2026. Total costs, average costs, and price and cost indices were calculated with 2020 as the base year = 100, from which the cost-price gap and terms of trade were estimated. The results show that feed, fingerlings, and health supplies constitute the main components of production costs, with grow-out feed showing the greatest increase during the analyzed period. In 2025 and 2026, the index was below 100, indicating that cost growth outpaced product price increases. It is concluded that analysis using cost, price, and terms-of-trade indices is a useful tool for identifying the cost-price squeeze phenomenon early on and assessing the economic vulnerability of aquaculture units.

Keywords: *Oreochromis niloticus*, profitability, production costs, terms of trade, aquaculture

Introducción

La acuicultura se ha consolidado como una de las actividades productoras de alimentos de origen animal de mayor importancia a nivel mundial, debido a su contribución a la seguridad alimentaria, la generación de empleo, el desarrollo de las comunidades rurales y el suministro de proteína de alto valor nutricional (El-Sayed, 2023). Durante las últimas décadas, el crecimiento sostenido de esta actividad ha permitido incrementar la disponibilidad de productos acuáticos frente al relativo estancamiento de la pesca de captura. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024), la producción mundial de pesca y acuicultura alcanzó aproximadamente 223.2 millones de toneladas en 2022, de las cuales 185.4 millones correspondieron a animales acuáticos y 37.8 millones a algas.

En México, las condiciones climáticas y la disponibilidad de cuerpos de agua han permitido el establecimiento de la producción de tilapia en diversas regiones. Particularmente, el estado de Oaxaca cuenta con condiciones naturales favorables para el desarrollo de la acuicultura continental, destacando la región de la Cuenca del Papaloapan, donde la presencia de grandes embalses ha permitido el establecimiento de sistemas productivos vinculados con la pesca y el cultivo de tilapia. Dentro de esta región sobresalen dos cuerpos de agua de especial importancia: la presa Miguel Alemán, también conocida como presa Temascal, y la presa Miguel de la Madrid Hurtado, conocida como presa Cerro de Oro. Ambos embalses han adquirido importancia no solamente por sus funciones hidráulicas, sino también por las actividades pesqueras y acuícolas desarrolladas por las comunidades asentadas en sus alrededores.

La construcción de los embalses Miguel Alemán y Miguel de la Madrid modificó considerablemente las actividades económicas y sociales de las comunidades de la región del Papaloapan. Con el tiempo, el aprovechamiento de estos cuerpos de agua permitió incorporar la producción acuícola como una alternativa de generación de alimentos e ingresos para numerosas familias. Actualmente, la producción de tilapia representa una actividad económica de importancia para comunidades indígenas y rurales localizadas alrededor de estos embalses, donde los productores enfrentan simultáneamente desafíos relacionados con la intensificación productiva, calidad del agua, enfermedades, alimentación, utilización de medicamentos, bienestar de los organismos y sostenibilidad económica de las unidades acuícolas (Antonio-Estrada et al., 2023).

Con una producción de 21,645 toneladas actuales, el estado de Oaxaca ocupa la posición número 17 en producción pesquera y acuícola a nivel nacional (INAPESCA, 2024). Las especies con mayor producción tanto acuícola como pesquera en el estado son: el camarón, la tilapia del Nilo, el guachinango y el jurel. La tilapia del Nilo (Oreochromis niloticus) es la especie más cultivada en el estado debido a su rápida tasa de crecimiento, alta eficiencia en la conversión alimenticia, facilidad de reproducción en cautiverio y amplia aceptación en el mercado (CONAPESCA, 2023). Estas características han favorecido su posicionamiento como una de las especies estratégicas para el fortalecimiento del sector acuícola en la entidad.

No obstante, la producción acuícola de tilapia del Nilo en el estado de Oaxaca ha mostrado un comportamiento estadísticamente irregular en la última década, de acuerdo con datos reportados por la Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA). En este periodo se observó una variabilidad significativa en la producción del estado de Oaxaca, por ejemplo, en años como 2015 o 2018, el nivel de producción alcanzó un promedio de hasta 16 mil toneladas anuales. En contraste, años como 2020 y 2023 reflejan caídas considerables en la producción, con apenas 506 y 218 toneladas anuales respectivamente (CONAPESCA, 2015-2024). Lo anterior es significativo ya que evidencia problemas estructurales evidentes en la producción.

Desde el análisis económico, los productores acuícolas enfrentan márgenes de rentabilidad reducidos debido al incremento sostenido en los costos de producción y al estancamiento —e incluso disminución— de los precios de mercado. De acuerdo con la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 2024), la combinación de altos costos de producción con precios de venta relativamente bajos está generando un fenómeno conocido

como cost-price squeeze. Este término se refiere a una situación en la que los precios de los insumos aumentan en mayor proporción que los precios de los productos finales, lo que comprime los márgenes de ganancia y compromete la viabilidad económica de las unidades de producción.

El efecto cost-price squeeze o estrangulamiento entre costos y precios representa uno de los principales desafíos económicos para la acuicultura, ya que ocurre cuando los costos de producción aumentan a un ritmo mayor que el precio de venta del producto, reduciendo progresivamente la rentabilidad de las unidades de producción1. En la producción de tilapia, este fenómeno se observa claramente por el incremento anual en el precio de insumos esenciales como las crías, el alimento balanceado, los medicamentos, los probióticos y los combustibles.

Con los datos analizados para el periodo 2020–2026, el costo de estos insumos presenta una tendencia creciente año con año, impulsada por la inflación, el aumento en los costos de transporte y la demanda de materias primas, como consecuencia, los productores enfrentan una disminución en sus márgenes de ganancia, lo que limita la capacidad de inversión, adopción de tecnologías y crecimiento del sector.

Por lo tanto, estudiar el fenómeno cost-price squeeze dentro de la producción acuícola no solamente representa un ejercicio de análisis económico, sino una herramienta potencial para comprender la vulnerabilidad de los productores frente a cambios en los precios de los insumos y del producto final. Su evaluación en la producción de tilapia puede contribuir a generar indicadores útiles para productores, investigadores y responsables de programas de desarrollo acuícola, permitiendo establecer estrategias encaminadas a reducir costos, mejorar la eficiencia en el uso de insumos y fortalecer los mecanismos de comercialización.

Materiales y métodos

Tipo y enfoque de la investigación

El presente estudio es de tipo diagnóstico descriptivo ya que busca identificar y caracterizar las principales condiciones y circunstancias relacionadas la producción de tilapia del Nilo en el área de estudio. Se considera descriptivo porque los análisis se realizaron sin manipular las variables de estudio, la información se recolectó con el propósito de medir y describir las características del fenómeno (Ramos-Galarza, 2020).

Asimismo, el estudio presenta un diseño longitudinal ya que algunas variables como los

precios de mercado y los costos de insumos se analizaron utilizando información estadística histórica. Lo que permite observar su evolución en el tiempo. La investigación tiene un enfoque cuantitativo, dado que se emplean técnicas de análisis estadístico para el procesamiento de la información, la estadística descriptiva y el análisis de relaciones entre variables.

Localización de la zona de estudio

La investigación se realizó en el municipio de San Pedro Ixcatlán, el cual se encuentra localizado al norte del estado de Oaxaca, dentro de la región de la Cuenca del Papaloapan. Esta localidad se sitúa a orillas de la presa Miguel Alemán, también conocida como Mil Islas, a una distancia aproximada de 60 km de la ciudad de San Juan Bautista Tuxtepec. Geográficamente, el área de estudio se encuentra ubicada en las coordenadas 18°09’ de latitud norte y 96°30’ de longitud oeste, con una altitud promedio de 150 metros sobre el nivel del mar (msnm) (INEGI, 2022).

Población y muestra

La población de estudio está conformada por los productores de tilapia del municipio de San Pedro Ixcatlán, Oaxaca. Algunos de ellos cuentan con permisos emitidos por CONAPESCA.

Sin embargo, en el estudio de exploratorio, los entrevistados afirmaron que ha habido un incremento de productores que no cuentan con permisos por lo que se desconoce el número actual de productores dedicados a la actividad. Es por ello que para determinar la muestra se utilizó un muestreo aleatorio simple (MAS) con universo desconocido, se asume que el parámetro de interés representa una distribución normal, de acuerdo con la fórmula utilizada por Ranganathan y Pramesh (2024):

$$n = \frac{Z^2.p.q}{e^2} \qquad n = \frac{1.96^2 * 0.5 * 0.5}{0.1^2} = 96 \qquad (1)$$

Donde:

Z = Nivel de confianza deseado (95%), por lo que valor de Z calculado en tablas = 1.96

p = % estimado (0.5)
q = 1 – p
e = Error que se prevé cometer (0.1)

En total se aplicaron 100 encuestas, se incluyeron 96 y se descartaron 4 debido a que faltaron algunos costos de producción.

Encuesta

El instrumento utilizado para la recolección de datos en la encuesta fue un cuestionario, mismo que se aplicó personalmente en la zona de estudio a los propietarios o encargados de la granja en producción y tiene una extensión de 29 preguntas. La obtención de la información se complementó con la observación directa de las actividades realizadas en el momento de la visita.

El cuestionario consta de 4 secciones. La primera sección recopila los datos de identificación del productor, donde se incluyeron 7 preguntas. El segundo apartado se compone de preguntas relacionadas con la unidad de producción aquí se exploran las variables de densidad, alimentación y actividades de manejo sanitario en un total de 12 preguntas. En la sección 3 se profundiza sobre la problemática para ello se plantearon 6 preguntas y finalmente se concluye con 4 preguntas relacionadas con ingresos, costos y comercialización. Cabe mencionar que para la construcción de las secciones 2 y 3 se ha utilizado como referencia a Alday-Sanz (2022) y Martínez (2024).

.

Efecto cost-price squeeze

La determinación del efecto cost-price squeeze (estrangulamiento costo-precio) en el cultivo de tilapia se realizó en 2 fases; primero se construyó una base de datos histórica (2020 a 2026) de costos y precio del producto. Se usaron los indicadores de costos más representativos:

Costos totales (CT).

Este indicador se utilizó ya que representa la base económica de un proceso productivo ya que integra la totalidad de los insumos requeridos para la producción; tanto los costos fijos, como los costos variables. A partir de la siguiente ecuación es posible determinar de manera precisa cual es el costo de producción de tilapia por cultivo (Rodríguez-Hernández. et al.,

2025).

$$CT = \sum_1^n CF + \sum_1^k CV \qquad (2)$$

Costos medios (CMe).

Este indicador se empleó para identificar la eficiencia económica de los sistemas, al igual que el comportamiento de los sistemas frente a las variables de escalas debido a que nos permite estimar el costo unitario de producción, es decir, el costo promedio por unidad producida. Este indicador se obtiene al dividir los costos totales de producción entre la cantidad total producida, y resulta fundamental para comparar la eficiencia económica entre unidades productivas, identificar áreas de ineficiencia. (Rodríguez-Hernández et al. 2025).

CMe CT/Q (3)

Una vez recopilados los costos de producción registrados por los productores y el precio de venta histórico, se obtuvo la indexación con un año base 2020=100. Los índices permiten hacer comparaciones en términos reales de las cantidades en pesos corrientes. El índice promedio de los costos se obtuvo a partir de la media simple de los 8 insumos considerados en este estudio (alevines, alimento, medicamento, probiótico y combustible)

A partir de la comparación de índices (precios y promedio de costos) se calculó la brecha costo-precio. Los valores positivos indican que el precio del producto crece en mayor proporción de lo que crecen los costos y valores negativos representan lo contrario presentando en este caso el cost-price squeeze. Finalmente se calculó el índice de intercambio. Este indicador representa el poder adquisitivo del productor en relación al año base. Si el resultado es igual a 100 significa que tanto precio como costos evolucionaron en la misma proporción. Si resulta mayor a 100 refleja una mejora en el poder adquisitivo del productor mientras que si es menor a 100 representa un deterioro (FAO, 1991).

$$\mathbf{TI} = \frac{\textbf{Índice de precios}}{\textbf{Índice promedio de costos}} * \mathbf{100} \qquad (4)$$

Resultados y discusión

Sistema Productivo

En San Pedro Ixcatlán, Oaxaca, la producción de tilapia se desarrolla principalmente mediante un sistema intensivo en jaulas flotantes instaladas dentro de la presa Miguel Alemán, también conocida como presa Temascal. Este sistema permite aprovechar directamente el cuerpo de agua del embalse, manteniendo a los peces confinados dentro de estructuras de malla mientras existe un intercambio continuo de agua con el ambiente exterior. El ciclo de producción de tilapia en jaulas flotantes puede dividirse principalmente en las etapas de siembra, preengorda, engorda y cosecha. Este sistema permite aprovechar directamente el volumen de agua disponible en los embalses sin requerir la construcción de estanques terrestres y facilita el manejo, alimentación, observación y cosecha de los organismos. Sin embargo, la productividad de las jaulas depende de la calidad ambiental del cuerpo de agua y del manejo realizado por los productores. (Antonio-Estrada et al., 2023).

De acuerdo con los resultados de la encuesta, las unidades de producción de Tilapia de San Pedro Ixcatlán, en Oaxaca, presentan una estructura de costos erogables, según se evidencia en la figura 1.



Figura 1. Costos erogables del productor de Tilapia en San Pedro Ixcatlán, en Oaxaca

En la estructura de costos erogables de la producción acuícola (figura 2) es posible identificar 6 rubros importantes mano de obra, material biológico, alimentación, sanidad, energía y mantenimiento. Identificar los componentes con mayor influencia en los costos facilita la toma de decisiones relacionadas con la eficiencia y rentabilidad de las unidades acuícolas (Rodríguez-Hernández et al., 2025). Es necesario puntualizar que los costos de producción considerados en esta distribución porcentual corresponden a un ciclo de producción del año 2025.

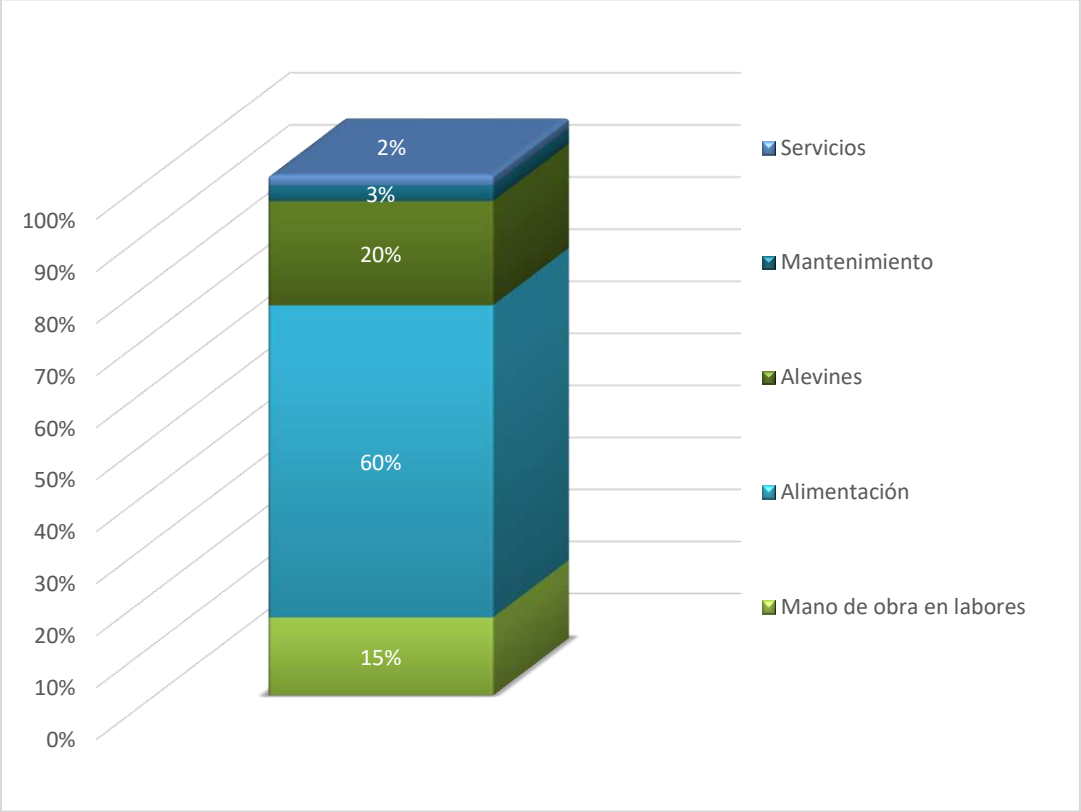


Figura 2. Participación porcentual de los costos erogables de Tilpia en San Pedro Ixcatlán, en Oaxaca 2025

Las actividades operativas realizadas por la mano de obra durante el proceso de producción, listadas en esta estructura, comprenden desde la preparación para el cultivo hasta la cosecha. Las actividades comprenden la preparación de estantes y su mantenimiento, siembra, alimentación, monitoreo tanto de agua como de crecimiento, diversas labores de mantenimiento y cosecha. Cabe señalar que, en unidades con alto grado de tecnificación, la mecanización de algunos procesos ha logrado reducir el costo de estas actividades, sin embargo, en las pequeñas y medianas unidades de producción la mano de obra sigue representando un componente significativo.

En general, el ciclo de producción de la tilapia comprende tres etapas de alimentación, debido a que los requerimientos nutricionales varían, lo más recomendable es diferenciar el alimento

proporcionado en cada etapa, lo que lo convierte en el monto más alto. Los apartados de servicios y mantenimiento contemplan gastos de energía eléctrica, agua, y medicamentos, entre otros aunque este rubro suele representar una proporción menor del costo total, desempeña un papel estratégico para disminuir la incidencia de enfermedades y evitar pérdidas económicas derivadas de mortalidades o disminuciones en el crecimiento. Una adecuada bioseguridad reduce la necesidad de tratamientos correctivos y mejora la sostenibilidad del sistema productivo.

El cuadro 1 muestra la evolución de los precios de mercado de los principales componentes de costo de tilapia en jaulas flotantes durante el periodo de 2020-2026. En términos generales se observa una tendencia creciente en números nominales, siendo el alimento 5.5 el que presenta mayor incremento y la gasolina magna el menor. Este comportamiento refleja el efecto combinado del incremento real en costos de producción, comercialización y distribución y variación de precios internacionales, así como el fenómeno inflacionario.

Cuadro 1. Evolución anual de los principales costos erogables del sistema de producción de tilapia en jaulas flotantes (Precios a pesos corrientes)

Año	Alevines	Alimento 1.5 mm (25 kg)	Alimento 2.5 mm (25 kg)	Alimento 5.5 mm (20 kg)	Florfenicol (kg)	Enrodes (kg)	Dvacua (L o kg)	Gasolina Magna (MXN/L)
2020	$0.85	$830	$760	$300	$1,250	$900	$350	$18.45
2021	$0.89	$870	$790	$320	$1,330	$970	$380	$20.32
2022	$1.00	$930	$850	$360	$1,450	$1,050	$420	$22.08
2023	$1.07	$995	$920	$430	$1,580	$1,180	$470	$22.63
2024	$1.15	$1,080	$990	$520	$1,720	$1,320	$530	$23.74
2025	$1.26	$1,150	$1,050	$600	$1,900	$1,480	$590	$24.16
2026	$1.36	$1,199	$1,099	$649	$2,100	$1,700	$680	$24.58

En relación con los precios del producto por kilogramo, en un lapso de 26 años, el precio

incrementó de $25.83 (1999) a $60.13 (2026) presentando un incremento acumulado del 132% lo que equivale a una tasa de crecimiento compuesta (CAGR) de 3.35 anual por debajo de la tasa de inflación general presentada en el país durante el mismo periodo. Se distinguen tres fases de comportamiento: La primera fase de 1999 a 2014 presenta un comportamiento de estancamiento con oscilaciones ($24-$34) y 3 caídas notables en los años 2001, 2003 y 2009. En el periodo que correspondiente a los años 2015-2020 se empieza a notar una tendencia creciente, sin embargo, disminuye a partir de 2018 cerrando la fase justo antes de pandemia en su nivel más bajo. Finalmente, la fase 3 es la más volátil y errática ya que hay incrementos de entre 12 y 23% pero también hay descensos de hasta -12% en el precio. En los últimos 7 años la variación en precios fue mucho más alta que en los 21 años anteriores combinados.

No obstante, es importante considerar que en términos de dinero, la comparación en el tiempo debe realizarse en términos reales. En el cuadro 2 se presentan los costos más los precios para el periodo 2020-2026, indexado a 2020=100.

Cuadro 2. Comparativo de insumos de producción más el precio de la tilapia, indexados a 2020=100

Año	Alevines	Alim. 1.5mm	Alim. 2.5mm	Alim. 5.5mm	Florfenicol	Enrodes	Dvacua	Gasolina	Precio	Costo prom.
2020	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
2021	104.7	104.8	103.9	106.7	106.4	107.8	108.6	110.1	122.5	106.6
2022	117.6	112.0	111.8	120.0	116.0	116.7	120.0	119.7	150.8	116.7
2023	125.9	119.9	121.1	143.3	126.4	131.1	134.3	122.7	137.2	128.1
2024	135.3	130.1	130.3	173.3	137.6	146.7	151.4	128.7	153.9	141.7
2025	148.2	138.6	138.2	200.0	152.0	164.4	168.6	130.9	135.3	155.1
2026	160.0	144.5	144.6	216.3	168.0	188.9	194.3	133.2	159.1	168.7

La figura 3 se evidencia el comportamiento irregular del precio del producto, mismo que no mantiene una tendencia sostenida de crecimiento sino que está expuesto por las condiciones de mercado. En relación con los costes, se presenta una tendencia creciente, no obstante no todos crecen al mismo ritmo. El precio del alevín muestra un incremento continuo,

practicamente lineal, mientras que el alimento 5.5 mm, el suplemento Dvacua y el medicamento Enrodes registraron incrementos considerandos entre el 90 y 116%. Los otros costos muestran crecimientos más moderados.

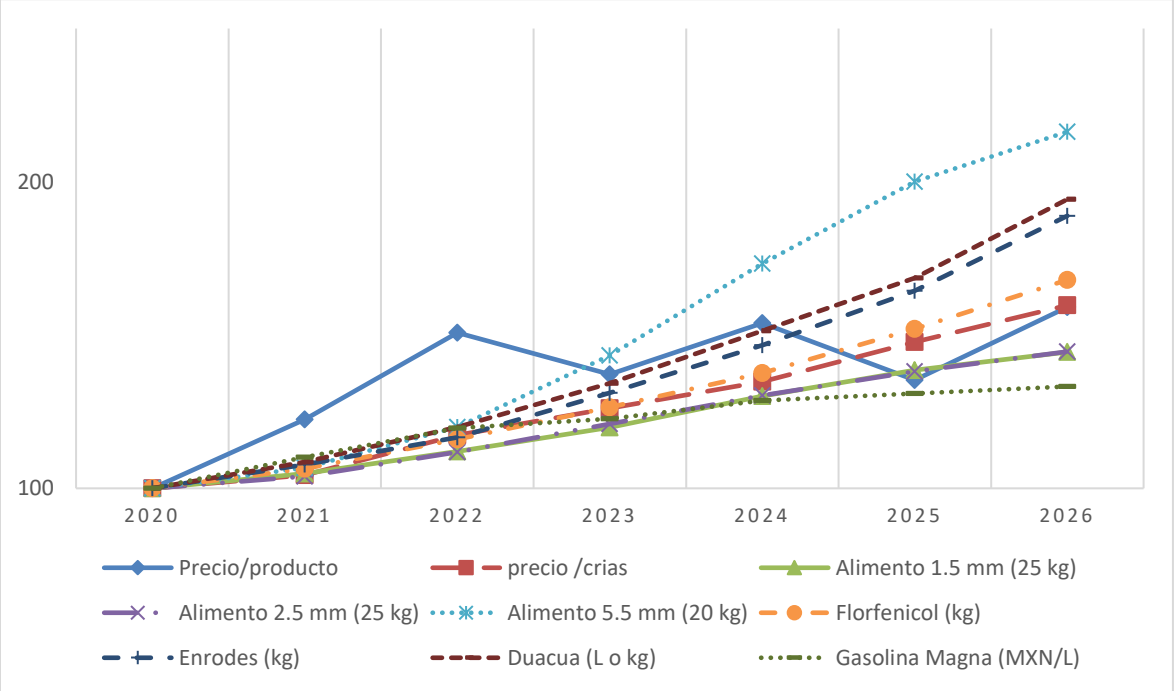


Figura 3. Evolución comparativa de costos erogables y precios de tilapia 2020-2026

En términos de producción el indicador cost-price squeeze representa la brecha entre el aumento de los costos de los insumos que eroga el productor y el aumento que se da en el precio del producto. Para este análisis se calculó el índice de costos promedio (media simple de los 8 insumos indexados) y se comparó con el índice de precios durante el mismo periodo (cuadro 3).

Cuadro 3. Cost-Price Squeeze de tilapia en el periodo 2020-2026

Año	Índice precio	Índice costo prom.	Brecha (pp)	Términos de intercambio
2020	100.0	100.0	0.0	100.0
2021	122.5	106.6	+15.9	114.9

2022	150.8	116.7	+34.1	129.2
2023	137.2	128.1	+9.1	107.1
2024	153.9	141.7	+12.2	108.6
2025	135.3	155.1	−19.8	87.2
2026	159.1	168.7	−9.6	94.3

Durante el periodo 2020 a 2022 el precio crece en mayor proporción de lo que lo hacen los costos, en términos de intercambio el productor era capaz de comprar 29% más insumos por kilo vendido que en 2020. Sin embargo, en 2023 y 2024 la brecha se reduce alrededor de la mitad (+9; +12), no obstante, sigue siendo positiva dándole al productor un margen de ganancia superior al del año base. En 2025, el costo supera al precio del producto (-19.8), el intercambio cae a 87.2 siendo el menor durante este periodo. Finalmente, en 2026 hay una recuperación pero siguen siendo más altos los costos de producción que lo que el productor recibe por kilo de tilapia. El productor tiene la capacidad de comprar 5.7% menos insumos por kilo vendido que en 2020.

El origen estructural del squeeze no está en el precio en sí (que de hecho creció a un CAGR decente de 8.05% en 2020-2026), sino en que tres insumos concretos crecen sistemáticamente más rápido, año tras año, sin excepción: alimento de engorda 5.5mm (216.3 en 2026, +116% acumulado), Duacua (194.3, +94%) y Enrodes (188.9, +89%). Estos tres nunca retroceden un solo año, mientras que el precio sí lo hace con frecuencia (2023, 2025) — por eso el squeeze aparece justo en los años de precio débil, aunque el promedio de varios años se vea razonable.

Conclusiones

El margen del productor no se ha erosionado de forma lineal, sino en escalones — se recupera en años de precio alto (2022, 2024) pero se golpea con fuerza en años de precio bajo (2023, 2025), mientras los costos —especialmente alimento de engorda y sanidad— nunca bajan. Esto apunta a que el sistema es vulnerable no solo a la tendencia de costos, sino a la volatilidad del precio de venta, que en los últimos 5 años ha sido mucho más errática que en toda la historia previa de la serie.

La comparación entre la evolución del precio del producto y los costos erogables de producción evidencian un proceso de estrechamiento de márgenes (cost-price squeeze). El precio de la tilapia aumentó alrededor de 55% respecto al año base mientras que los insumos crecieron entre 90 y 120%. Lo anterior implica que el aumento en precio del producto es insuficiente para cubrir el incremento en el costo de producción.

El sistema no vive un squeeze gradual y constante, sino uno oculto por la volatilidad del precio, los costos suben de forma casi monótona todos los años, mientras el precio disimula el problema

en años buenos (2022, 2024) y lo expone brutalmente en años malos (2025 y 2026). Si el patrón de precio errático continúa, la caída podría no ser un evento aislado sino el inicio de una fase donde el squeeze se vuelve la norma en lugar de la excepción.

Literatura citada

Libro

Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca (CONAPESCA). (2015–2024). *Anuarios Estadísticos de Acuacultura y Pesca* (ediciones 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023 y 2024). Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Gobierno de México.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1991). *Policy analysis: Basic data series and their use*. https://www.fao.org/4/s9752e/S9752E02.htm

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2024). *The state of world fisheries and aquaculture 2024: Blue transformation in action* [El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2024: La transformación azul en acción].

Instituto Nacional de Pesca y Acuacultura (INAPESCA). (2024). Sustentabilidad y Pesquerías: Diagnóstico de la producción pesquera y acuícola nacional. Dirección General de Investigación Pesquera en el Pacífico; Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2024). *Margin Squeeze*. OECD Roundtables on Competition Policy Papers. https://www.oecd.org/en/publications/margin-squeeze_cb1e895c-en.html

Martínez Lara, P. (2024). *Identificación de bacterias causantes de enfermedades granulomatosas en tilapia cultivada en granjas comerciales y estudio del microbioma asociado a las lesiones causadas* [Tesis doctoral, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.].

Revistas

Alday-Sanz, V., Brock, J., Flegel, T. W., McIntosh, R., Bondad-Reantaso, M. G., & Salazar, M., et al. (2020). Facts, truths and myths about SPF shrimp in aquaculture. *Reviews in Aquaculture***,** 12(1), 76–84. https://doi.org/10.1111/raq.12305

Antonio Estrada, C., Martínez Castro, C.J., Sánchez Hernández, H.H., Sánchez Medina, M.A. and García Montalvo, I.A. (2023) 'Características distintivas del cultivo de tilapia del Nilo (Oreochromis niloticus) en la región del Papaloapan, Oaxaca, México', *Revista IPSUMTEC*, 6(5), pp. 68–78. doi:10.61117/ipsumtec. v6i5.220.

El-Sayed, A.-F. M., & Fitzsimmons, K. (2023). From Africa to the world—The journey of Nile tilapia [De África al mundo: el recorrido de la tilapia del Nilo]. *Reviews in Aquaculture*, 15(S1), 6–21.

Ramos-Galarza, C. A. (2020). Los alcances de una investigación. *CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, *9*(3), 1-6.

Ranganathan, P., Deo, V., & Pramesh, C. S. (2024). Sample size calculation in clinical research. *Perspectives in Clinical Research*, 15(3), 155–159. https://doi.org/10.4103/picr.picr_100_24

Rodríguez-Hernández, M. E., Martínez-Castellanos, G., López-Méndez, M. C., Reyes-González, D., & González-Moreno, H. R. (2025). Production costs and growth performance of tilapia (Oreochromis niloticus) in intensive production systems: A review. *Sustainability*, 17(4), 1745. https://doi.org/10.3390/su17041745

Referencia electrónica

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2022) Indicadores por entidad federativa Oaxaca, disponible en https://www.inegi.org.mx/app/indicadores/ [02/02/2026].

Evaluación del potencial de hojas de huizache como alimento para rumiantes

Diana Sofía Torres Velázquez[75], Karina Aide Araiza Ponce, Pablo Alfredo Domínguez Martínez, Rafael Jiménez Ocampo

Resumen

La situación ambiental y económica a nivel mundial hace necesario incorporar fuentes alternativas de alimentación para rumiantes, entre las propuestas destaca *Acacia* sp., o "huizache", abundante en el norte de México. El objetivo es analizar la composición química y digestibilidad de hojas de huizache de dos especies para determinar su potencial alimenticio y momento óptimo de cosecha. Se colectaron hojas de *Acacia farnesiana* y *A. schaffneri* durante las 4 estaciones (12 meses) y se realizaron análisis bromatológicos, de metabolitos secundarios (fenoles totales y taninos condensados) y de digestibilidad in vitro. Para el análisis estadístico se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2×4 (dos especies y cuatro estaciones) y el procedimiento MIXED de SAS. Se observaron interacciones entre la estación y la especie ($p<0.05$) para todas las variables excepto para proteína cruda y hemicelulosa donde la estación y la especie ejercieron efectos de manera independiente ($p<0.05$). El mayor contenido de proteína cruda se registró en primavera y en la especie *A. farnesiana*. La mayor concentración de metabolitos secundarios se obtuvo en *A. schaffneri* durante la primavera y el invierno. El mayor contenido de celulosa se corresponde a *A. schaffneri* durante la primavera y el verano. Los carbohidratos no estructurales fueron mayores en *A. farnesiana* durante el otoño e invierno. Se concluye que *A. farnesiana* posee mayor potencial como alimento para rumiantes por su mayor contenido de proteína y digestibilidad, mientras que *A. schaffneri* podría aprovecharse para incrementar el aporte de fibra y metabolitos secundarios.

Palabras clave: *Acacia farnesiana*, *Acacia schaffneri*, fuentes de alimentación, rumiantes**.**

[75] Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango. Carretera al Mezquital Km 11.5, Durango, Dgo. México. torresofia@gmail.com, karii_araiza@hotmail.com, dominguez.pablo@inifap.gob.mx, jimenez-rafael@inifap.gob.mx

Abstract

The global environmental and economic situation brings the need to incorporate alternative feed sources for ruminants. Among the proposed alternatives, *Acacia* sp., commonly known as "huisache" or “sweet acacia”, abundant in northern México, stands out. The objective was to analyze the chemical composition and digestibility of huisache leaves from two species to determine their nutritional potential and optimal harvest time. Leaves of *Acacia farnesiana* and *A. schaffneri* were collected during all four seasons (12 months), and bromatological, secondary metabolites (total phenols and condensed tannins), and in vitro digestibility analyses were performed. A completely randomized design with a 2×4 factorial arrangement (two species and four seasons) and the SAS MIXED procedure were used for statistical analysis. Interactions between season and species ($p<0.05$) were observed for all variables except crude protein and hemicellulose, where season and species had independent effects ($p<0.05$). The highest crude protein content was recorded in spring in *A. farnesiana* species. The highest concentration of secondary metabolites was obtained in *A. schaffneri* during spring and winter. The highest cellulose content was also recorded in *A. schaffneri* during spring and summer. Non-structural carbohydrates were highest in *A. farnesiana* during autumn and winter. It is concluded that *A. farnesiana* has greater potential as a ruminant feed due to its higher protein content and digestibility, while *A. schaffneri* could be used to increase the supply of fiber and secondary metabolites.

Keywords: *Acacia farnesiana*, *Acacia schaffneri*, feed sources, ruminants.

Introducción

La ganadería de rumiantes es crucial para la economía de la mayoría de los países en desarrollo, como México. Sin embargo, esta actividad se enfrenta a una problemática ambiental compleja que se asocia con el cambio climático, la escasez de forrajes de calidad especialmente en las zonas áridas y semiáridas del norte del país, y a la competencia de los alimentos convencionalmente empleados con el consumo humano (FAO, 2025). Por ello, es necesario buscar fuentes alternativas para la alimentación que puedan emplearse en la suplementación del ganado como una estrategia para alcanzar el desempeño productivo adecuado (Dida et al., 2024).

Entre las alternativas propuestas se encuentran especies ampliamente disponibles de manera natural en los agostaderos como *Acacia* sp., comúnmente llamado “huizache”. *Acacia* sp. comprende diversas especies de arbustos entre ellos *Acacia farnesiana* y *Acacia schaffneri.* Ambos poseen un buen contenido de proteína cruda y de metabolitos secundarios que, al ser

incluidos en la dieta de rumiantes, pueden mejorar la eficiencia en la fermentación y la disminución del metano emitido (García Piña et al, 2020; Torres-Velázquez et al., 2024). Este género presenta como ventaja adicional que la deforestación, sobrepastoreo y erosión favorecen su propagación debido a su capacidad de adaptación, resistencia y bajo requerimiento hídrico (Cabrera-Nuñez et al., 2019).

Dado su potencial como alimento para rumiantes, es necesaria una evaluación de los cambios en su composición a lo largo del año para determinar los momentos óptimos de cosecha para asegurar su correcta introducción en un sistema productivo (Garay Martínez et al., 2024). La hipótesis central del presente trabajo plantea que las características nutricionales de las hojas de huizache varían en función de la especie y de la estación del año.

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue analizar los cambios en la composición química, contenido de metabolitos secundarios y en la digestibilidad *in vitro* de las hojas de huizache, recolectadas mensualmente, durante un año, en dos especies con amplia distribución en el estado de Durango, México: *Acacia farnesiana* y *Acacia schaffneri*, con la finalidad de determinar el momento óptimo de cosecha.

Materiales y métodos

Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Posgrado de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Juárez del Estado de Durango.

Colecta. Las hojas de huizache fueron obtenidas a partir de octubre de 2023 y hasta septiembre de 2024 en dos áreas suburbanas abundantes en vegetación de huizache aledañas a la ciudad de Durango, Dgo. México: *Acacia farnesiana*, 23º59’0.9” N, 104º41’33.6” W, 1890 m, y *Acacia schaffneri* 23º59’38” N, 104º32’34” W, 1870 m. Durante los primeros días de cada mes, ramas de aproximadamente 1m de longitud se cortaron de cinco arbustos de cada especie seleccionados al azar. Las hojas fueron separadas manualmente y mezcladas en un pool por especie y por mes luego se secaron a 55°C por 48h y se molieron hasta un tamaño de 2mm (molino Arthur H. Thomas Willey, Philadelphia, PA, USA, Bear Cat #1A-S, Westerns Land and Roller Co., Hastings, NE, USA). Las muestras se agruparon por estación: “primavera” incluyó las tomadas en abril, mayo y junio; “verano”, las de julio, agosto y septiembre; “otoño”, octubre, noviembre y diciembre; e “invierno”, enero, febrero y marzo. Todos los análisis se realizaron por triplicado.

Análisis proximal. Las determinaciones incluyeron materia seca (MS, 930.15), materia orgánica (MO, 942.05), proteína cruda (PC, 990.03), y extracto etéreo (EE, 920.39) de acuerdo con procedimientos estandarizados por la AOAC (2019).

Metabolitos secundarios. Los fenoles totales (FT) y los taninos condensados (TC) fueron extraídos y cuantificados mediante curvas estándar de ácido gálico y de catequina de acuerdo con lo reportado por Heimler et al. (2005). Las lecturas se hicieron en un espectrofotómetro UV-VIS (Spectronic Instruments, Genesys 10S, Mod. 336003). FT se reportaron en equivalentes de ácido gálico y los TC en equivalentes de catequina.

Estimación de carbohidratos. Las fracciones de fibra se determinaron con un analizador de fibras ANKOM (Fiber Analyzer 200, ANKOM Technology, Macedon, NY,USA) y las instrucciones del fabricante para obtener Fibra Detergente Neutra (FDN), Fibra detergente ácida (FDA), hemicelulosa (HEM), celulosa (CEL) y lignina (LIG). Los carbohidratos totales (CT) y los carbohidratos no estructurales (CNE) se estimaron con las Fórmulas 1 y 2 respectivamente.

$$CT = [100 - (PC + EE + (100 - MO))] \quad (1)$$

$$CNE = CT - FDN \quad (2)$$

Digestibilidad *in vitro.* La digestibilidad de la materia seca (DIVMS) y la digestibilidad de la materia orgánica (DIVMO) se determinaron tras 48h de fermentación en un incubador Daisy^{II} (ANKOM Technology, Macedon, NY, USA), con los procedimientos propuestos por el fabricante. Se utilizó líquido ruminal como inóculo, el cual se obtuvo de dos novillos fistulados del rumen (≈680 kg peso vivo). Los procedimientos quirúrgicos realizados fueron aprobados por el Comité de Protección Animal del Estado de Durango en concordancia con la Norma Oficial Mexicana (NOM-062-ZOO-1999).

Análisis estadístico. Los datos obtenidos fueron analizados mediante el procedimiento MIXED de SAS (Versión 9.0; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Se usó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2×4, con dos especies (*Acacia farnesiana* y *Acacia schaffneri*) y cuatro estaciones (primavera, verano, otoño e invierno).

Las especies, las estaciones y su interacción fueron considerados efectos fijos; las réplicas fueron tratadas como efectos aleatorios. Las medias por mínimos cuadrados se compararon mediante el ajuste de Tukey. Se consideró un valor de significancia estadística de $p < 0.05$.

Resultados y discusión

Análisis proximal. En la Tabla 1 se muestran los datos y los resultados del análisis estadístico. La proteína cruda (PC) no mostró interacción significativa especie × estación ($p > 0.05$), sin embargo, tanto la especie ($p < 0.05$) como la estación ($p < 0.001$) ejercieron efectos significativos. El valor más alto de PC se obtuvo en primavera y disminuyó progresivamente hacia el invierno. Por otro lado, *Acacia farnesiana* presentó mayor contenido de PC que *Acacia schaffneri*. El contenido de PC fue mayor en primavera y la disminución conforme transcurren las estaciones reflejan la dinámica de crecimiento vegetativo, ya que, durante la primavera, se presenta el rebrote ante el incremento de temperaturas y existe un desarrollo activo de las hojas por lo que un incremento en la actividad metabólica promueve la asimilación de nitrógeno y, en consecuencia, la síntesis de proteína (Wery, 1986; Casiano y Paz, 2018). La ausencia de interacción especie × estación en esta variable sugiere una respuesta similar de ambas especies y refuerza el efecto de la fenología sobre la respuesta específica por especie. El contenido de PC en *A. farnesiana* podría asociarse con mayor eficiencia para fijación de nitrógeno y por lo tanto mayor calidad nutritiva. En contraste, la composición de *A. schaffneri* podría favorecer al desarrollo de mayor resistencia al estrés ambiental y al consumo por parte de herbívoros lo que disminuye su potencial para emplearse como elemento principal en la dieta de rumiantes, esto es esperable considerando las diferencias físicas entre ambas especies y su distribución, ya que *A. farnesiana* posee raíces más profundas y una mayor propagación (Ruacho-González *et al.,* 2017; CONAFOR, 2018).

En el porcentaje de materia seca (MS) se observó una interacción significativa especie × estación ($p < 0.05$). Los valores más altos se registraron en *A. schaffneri* durante el otoño, mientras que, los menores ocurrieron en *A. farnesiana* durante la primavera e invierno. El porcentaje de materia orgánica (MO) fue afectado de forma significativa por la estación y especie ($p < 0.001$), con el menor valor encontrado en *A. schaffneri* durante el otoño. La porción de extracto etéreo (EE) fue afectada tanto por la especie como por la estación y se observó una interacción significativa ($p < 0.05$); los mayores valores se obtuvieron en otoño para la especie *A. farnesiana*.

Metabolitos secundarios. La presencia de fenoles totales (FT) y taninos condensados (TC) fue afectada de manera significativa por la especie y la estación ($p < 0.05$) como también se observa en la Tabla 1. *Acacia schaffneri* presentó concentraciones más altas durante primavera e invierno, con una disminución detectada en otoño. Los metabolitos secundarios son ampliamente reconocidos por su rol en la defensa de la planta y tolerancia al estrés, por lo que las fluctuaciones en la concentración de FT y TC observadas en este estudio confirman que variaciones en condiciones como la temperatura y la disponibilidad de agua entre estaciones modulan la síntesis de estas sustancias. Valores elevados en primavera pueden estar derivados de un incremento de las defensas durante el crecimiento activo y en invierno con una respuesta a condiciones de estrés (Liang et al., 2024). La presencia de los taninos condensados se considera deseable siempre y cuando su inclusión no supere los límites establecidos como seguros (5% de la MS), debido a que se ha observado que contribuyen a la modulación de metano (Piñeiro Vázquez et al., 2015) a través de mecanismos diversos y pueden contribuir a incrementar el porcentaje de proteína de sobrepaso (Jenko *et al.,* 2018).

Tabla1. Interacciones y Efectos Principales de la especie y estación sobre la Composición Proximal y Presencia de Metabolitos Secundarios

	Especie	Estación	COMPONENTE (%)					
			MS	MO	PC	EE	FT*	TC**
Interacciones	*A. farnesiana*	Primavera	94.69 c	95.19 a	19.42 a	2.47 bc	29.86 d	4.29 c
		Verano	95.17 c	94.19 ab	17.82 ab	2.07 cd	31.65 d	5.15 c
		Otoño	96.39 b	84.60 d	16.94 abc	3.56 a	26.59 d	4.20 c
		Invierno	94.59 c	90.03 bc	14.21 a	2.05 cd	32.01 d	5.61 c
	A. schaffneri	Primavera	95.18 c	89.00 c	17.66 ab	1.07 E	57.21 a	22.46 a
		Verano	96.19 b	88.32 cd	15.45 bc	1.60 de	46.93 bc	18.38 ab
		Otoño	97.43 a	86.70 cd	16.17 Bc	3.17 ab	44.69 c	14.27 b
		Invierno	94.81 c	86.10 cd	14.16 c	1.91 cde	53.56 ab	20.99 a
	p (a<0.05)		0.0327	0.0001	0.2921	0.0091	0.0164	0.0171
Efectos Principales	Especie	*A. farnesiana*	95.21 b	91.00 a	17.10 a	2.54 a	30.03 b	4.81 b
		A. schaffneri	95.90 a	87.53 b	15.86 b	1.94 b	50.60 a	19.03 a
	p (a<0.05)		<.0001	<.0001	0.0087	<.0001	<.0001	<.0001
	Estación	Primavera	94.93 c	92.09 a	18.54 a	1.77 b	43.54 a	13.37 a
		Verano	95.68 b	91.26 a	16.64 b	1.84 b	39.29 ab	11.76 ab
		Otoño	96.91 a	85.65 b	16.56 b	3.37 a	35.643 b	9.24 b
		Invierno	94.70 c	88.06 b	14.18 c	1.98 b	42.78 a	13.30 a

p (a<0.05)	<.0001	<.0001	<0.0001	<.0001	0.0003	0.0052
EEM	0.4893	2.8464	1.9395	0.5730	5.7495	3.8048

abcd: indican diferencia significative entre muestras. EEM: error estándar de la media. *Equivalentes de ácido gálico (mg/g MS). **Equivalentes de catequina (mg/g MS).

Estimación de carbohidratos. En la Tabla 2 se muestran los datos y los resultados del análisis estadístico para estos componentes. Tanto la fibra detergente neutra (FDN) como la fibra detergente ácida (FDA) fueron afectadas significativamente por la especie, estación y su interacción ($p < 0.05$). En general, *Acacia schaffneri* presentó concentraciones mayores de FDN y FDA que *A. farnesiana,* con los mayores valores registrados durante el verano y los menores en *A. farnesiana* durante el otoño. El contenido de lignina (LIG) siguió un patrón similar, con una interacción significativa entre la especie y la estación ($p < 0.05$), la menor proporción de LIG se encontró en *A. farnesiana* durante el otoño. En las fracciones de celulosa (CEL) y hemicelulosa (HEM) también se observaron interacciones significativas entre estaciones y especies ($p < 0.05$); los mayores valores de HEM se obtuvieron en la especie de *A. farnesiana* durante el invierno, mientras que los de CEL se registraron en *A. schaffneri* en la estación de verano. Los carbohidratos totales (CT) fueron influenciados por especie y estación ($p < 0.05$). *A. schaffneri* presentó mayor contenido de CT que *A. farnesiana* y los valores más altos se registraron durante primavera, verano e invierno. Los carbohidratos no estructurales (CNE) mostraron interacción significativa entre estación y estaciones ($p < 0.05$). Los mayores porcentajes se registraron en *A. farnesiana* durante el otoño y el invierno. Mayores valores de FDN, FDA y LIG en primavera y verano corresponden con un desarrollo activo y engrosamiento de la pared celular, mientras que en otoño e invierno se observó un incremento en la fracción no fibrosa (CNE), esto indica una relación inversa entre los carbohidratos estructurales y los no estructurales, y que los periodos de crecimiento reducido favorecen la acumulación de carbohidratos solubles en estas especies, esto podría asociarse con funciones adaptativas como la regulación osmótica y preparación para los siguientes ciclos de crecimiento durante la primavera cuando las condiciones son favorables y ocurre la floración (Casiano y Paz, 2018).

Tabla 2. Interacciones y Efectos Principales de la especie y la estación sobre las Fracciones Fibrosas, Carbohidratos totales y Carbohidratos no Estructurales

Interaccion	Especie	Estación	COMPONENTE											
			FDN		FDA		HEM		LIG		CEL		CT		CNE	
	A. farnesiana	Primavera	52.8	ab	42.5	ab	10.3	cde	13.3	bc	28.3	ab	67.7	c	14.9	c

		Verano	54.3	ab	43.2	ab	11.1	cd	13.6	bc	28.6	ab	69.2	c	14.9	c
		Otoño	38.9	e	24.8	d	14.2	ab	6.8	e	16.7	d	67.7	c	28.7	a
		Invierno	43.9	d	28.8	d	15.1	a	8.5	e	19.3	d	71.9	b	28.0	a
	A. schaffneri	Primavera	52.9	ab	44.5	a	8.4	e	14.3	ab	29.3	ab	75.1	a	22.2	b
		Verano	56.9	a	47.9	a	9.0	de	16.2	a	31.0	a	75.1	a	18.1	bc
		Otoño	50.4	bc	38.4	bc	12.0	bc	12.2	c	25.5	bc	69.9	bc	19.5	bc
		Invierno	47.6	cd	35.6	c	12.0	bc	10.4	d	24.4	c	75.2	a	27.6	a
	p (a<0.05)		<.0001		0.0001		0.707		<.0001		0.000		<.0001		<.0001	
Efectos **Principales**	Especies	*A. farnesiana*	47.5	b	34.8	b	12.67	a	10.6	b	23.2	b	69.1	a	21.6	a
		A. schaffneri	52.0	a	41.6	a	10.4	b	13.3	a	27.5	a	73.8	b	21.9	a
	p (a<0.05)		<.0001		<.0001		<.0001		<.0001		<.0001		<.0001		0.768	
	Estación	Primavera	52.8	b	43.5	a	9.3	b	13.8	a	28.8	a	71.4	b	18.5	c
		Verano	55.6	a	45.6	a	10.1	b	14.9	a	29.8	a	72.2	b	16.5	c
		Otoño	44.7	c	31.6	b	13.1	a	9.5	b	21.1	b	68.8	c	24.1	b
		Invierno	45.8	c	32.2	b	13.6	a	9.4	b	21.8	b	73.6	a	27.8	a
	p (a<0.05)		<0.0001		<.0001		<.0001		<.0001		<.0001		<.0001		<.0001	
	EEM		3.1642		3.7353		1.5907		1.2453		2.6422		1.5924		3.4533	

abcd: indican diferencia significativa entre muestras. EEM: error estándar de la media.

Digestibilidad *in vitro.* En la Tabla 3 se presentan los datos obtenidos y los resultados del análisis estadístico. Se observaron interacciones significativas entre la especie y la estación tanto en la digestibilidad de la materia seca (DIVMS) como de la materia orgánica (DIVMO). Los mayores valores para ambas variables se obtuvieron para la especie de *A. farnesiana* en el otoño. Esto se puede atribuir a la menor concentración de componentes de difícil digestión (LIG y CEL) y mayor disponibilidad de carbohidratos potencialmente fermentables (HEM y CNE), en conjunto estos cambios favorecen el acceso de los microorganismos ruminales al contenido celular y mejora la degradación del sustrato. Cabe resaltar, que, con base en los resultados de este análisis, el resto de las muestras son consideradas forrajes de baja calidad por tener una digestibilidad menor al 50% de acuerdo con criterios generales de clasificación (Van Soest, 1994).

Tabla 3. Interacciones y Efectos Principales de la especie y la estación sobre Digestibilidad *in vitro* de la Materia Seca y la Materia Orgánica

Interacción	Especie	Estación	DIGESTIBILIDAD	
			DIVMS	DIVMO

	A. farnesiana	Primavera	45.45 bc	44.20 bc
		Verano	46.34 bc	45.89 bc
		Otoño	58.31 a	65.24 a
		Invierno	49.32 b	54.23 ab
	A. schaffneri	Primavera	35.07 d	35.03 c
		Verano	38.27 cd	38.61 c
		Otoño	38.70 cd	37.20 c
		Invierno	42.16 bcd	44.53 bc
	p (a<0.05)		<.0001	<.0001
Efectos Principiales	Especie	*A. farnesiana*	49.85 a	52.39 a
		A. schaffneri	38.55 b	38.84 b
	p (a<0.05)		<.0001	<.0001
	Estación	Primavera	40.26 c	39.62 b
		Verano	42.30 c	42.25 b
		Otoño	48.50 a	51.22 a
		Invierno	45.74 b	49.38 a
	p (a<0.05)		<.0001	<.0001
	EEM		2.7196	3.8110

abcd: indican diferencia significativa entre muestras. EEM: error estándar de la media.

Los datos confirman la hipótesis inicial ya que indican que la estación de cosecha tuvo un fuerte efecto sobre la composición de las hojas de huizache. Primavera se caracterizó por un mayor contenido de PC y de las fracciones de fibra, mientras que otoño e invierno por mayores valores de CNE. La tendencia fue similar entre especies, ya que *A. farnesiana* presentó mayores valores de PC y menores de fibra y que *Acacia schaffneri* contiene un mayor porcentaje de FDN, FDA, LIG y FT. Lo anterior que indica que las condiciones ambientales y la etapa de desarrollo fueron los principales responsables de la distribución de nutrientes en la planta; es bien sabido que las primeras dictan la cantidad de recursos disponibles y desencadenan respuestas adaptativas, mientras que la etapa de desarrollo establece las prioridades de uso para asegurar el crecimiento, la reproducción y la supervivencia de la planta (Anderson y Song, 2025).

Conclusiones

A. farnesiana posee mayor potencial como alimento de rumiantes, sin embargo, el uso de ambas especies presenta ventajas según las características de las dietas en las que se desea incluir.

Aunque la mayor digestibilidad se registró durante el otoño, la primavera representa el momento óptimo de cosecha de hojas de huizache ya que en esta estación se obtuvieron contenidos mayores de proteína cruda y fenoles totales, además, en este momento suele presentarse escasez de forraje de calidad sobre todo en el norte del país. El uso de *A. farnesiana* aseguraría un mayor suministro de proteína por lo que podría emplearse como un suplemento proteico; además, las hojas de *A. farnesiana* en la estación de otoño, pueden aprovecharse como forraje de buena calidad dada su elevada digestibilidad. Por su parte, *A. schaffneri* puede ser empleado para incrementar el contenido de fibra y metabolitos secundarios en dietas ricas en carbohidratos no estructurales y proteína.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su más sincero agradecimiento al Grupo Disciplinar en Innovación Ganadera y Recursos Forrajeros, por su valiosa contribución y acompañamiento en el desarrollo de esta investigación dentro de la Línea de Aplicación y Generación de Conocimiento en Estrategias de alimentación y gestión sostenible de los sistemas de producción animal.

Literatura citada

Libros

AOAC International. (2019). *Official Methods of Analysis* (21st ed.). Association of Official Analytical Chemists International. pp. 69-79

FAO. (2025). *Workshop on the Role of Advisory Services in Ruminant Production – Synthesis Report, 3–6 November 2024.* Hungary. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://doi.org/10.4060/cd6181en pp. 25-28.

Ruacho-González, L., López-Enríquez, I. L., Acosta-Hernández, A. C., & Retana-Rentería, F. I. (2017). Las leguminosas (familia Fabaceae). En P. Hernández, J. Sánchez-Galván, J. Valero-Padilla, E. Melgarejo, K. Nájera-Cordero, J. Cruz-Medina, & D. López-Higareda (Eds.), *La biodiversidad en Durango. Estudio de Estado*. México. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. pp. 357-364.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2001). *Norma Oficial Mexicana NOM-062-ZOO-1999, Especificaciones técnicas para la producción, cuidado y uso de los animales de laboratorio*. Diario Oficial de la Federación. pp. 38-40

Van Soest, P. J. (1994). *Nutritional ecology of the ruminant* (2nd ed.). Comstock Publishing Associates, Cornell University Press. pp. 354-370.

Revistas

Anderson, J., & Song, B. H. (2020). Plant adaptation to climate change - Where are we? *Journal of Systematics and Evolution*, 58(5), 533-545. https://doi.org/10.1111/jse.12649

Cabrera-Núñez, A., Lammoglia-Villagomez, M., Alarcón-Pulido, S., Martínez-Sánchez, C., Rojas-Ronquillo, R., & Velázquez-Jiménez, S. (2021). Fodder trees and shrubs used to feed cattle in northern Veracruz, Mexico. *Abanico Veterinario*, 9, e915. https://doi.org/10.21929/abavet2019.913

Casiano Dominguez, M., & Paz Pellat, F. (2018). Patrones espectrales de la fenología del desarrollo vegetativo y reproductivo de árboles de huizache (*Acacia farnesiana* (L.) Willd.). *Terra Latinoamericana*, 36, 393–409. https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.417

Dida, M. F., Garcia, S. C., & Gonzalez, L. A. (2024). Dietary concentrate supplementation increases milk production and reduces predicted greenhouse gas emission intensity in pasture-based commercial dairy farms. *Journal of Dairy Science*, 107, 5639–5652. https://doi.org/10.3168/jds.2024-25238

García-Piña, E. Y., Herrera-Torres, E., Murillo-Ortiz, M., Reyes-Jáquez, D., Carrete-Carreón, F. O., & Pámanes-Carrasco, G. (2020). Dietary alternatives in livestock production for mitigation of greenhouse gas emissions in Mexico: GHG mitigation in Mexico. *Agro Productividad*, 13(10), 87–99. https://doi.org/10.32854/agrop.v13i10.1712

Garay Martínez, J. R., Maldonado Jáquez, J. A., Bautista Martínez, Y., Cigarroa Vázquez, F. A., Maciel Torres, S. P., & Granados Rivera, L. D. (2024). Fatty acid profile of forage shrubs in northern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(1), e3617. https://doi.org/10.29312/remexca.v15i1.3617

Heimler, D., Vignolini, P., Dini, M. G., & Romani, A. (2005). Rapid tests to assess the antioxidant activity of *Phaseolus vulgaris* L. dry beans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 3053–3056.

Jenko, C., Bonato, P., Fabre, R., Perlo, F., Tisocco, O., & Teira, G. (2018). Adición de taninos a dietas de rumiantes y su efecto sobre la calidad y rendimiento de la carne. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 29(56), 224–241. https://doi.org/10.33255/2956/355

Piñeiro-Vázquez, A. T., Canul-Solís, J. R., Alayón-Gamboa, J. A., Chay-Canul, A. J., Ayala-Burgos, A. J., Aguilar-Pérez, C. F., Solorio-Sánchez, F. J., & Ku-Vera, J. C. (2015). Potential of condensed tannins for the reduction of emissions of enteric methane and their effect on ruminant productivity. *Archivos de Medicina Veterinaria*, 47(3), 263-272. https://doi.org/10.4067/S0301-732X2015000300002

Wery, J., Turc, O., & Salsac, L. (1986). Relationship between growth, nitrogen fixation and assimilation in a legume (*Medicago sativa* L.). *Plant and Soil*, 96, 17–29. https://doi.org/10.1007/BF02374992

Referencias electrónicas

Comisión Nacional Forestal, 2018, "Fichas Técnicas de Especies Forestales: *Acacia farnesiana*." *CONAFOR, Gobierno de México, [Folleto electrónico],* México, disponible en: http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/874acacia%20farnesiana.pdf [23 de julio de 2026].

Optimización de la Producción y Calidad Láctea mediante la Aplicación de un Activador Ruminal (MEBA)

Pacheco Hernández Armando[76]

Resumen

Se seleccionaron un total de 46 vacas en ordeño (animales en producción), dichos animales se encontraban bajo las mismas condiciones de manejo, la base alimentaria principal lo constituyó el pasto. Los animales fueron divididos en dos grupo por tratamiento (23 con suplemento norgold y 23 con 50% de suplemento norgold + vitafert), en cada grupo se separaron animales de 10 a 100 días de lactancia y animales de 100 a 300 días de lactancia, formándose dos subgrupos, para comparar en cada grupo de tratamiento el efecto de 10 a 100 días y 100 a 300 días de lactancia

El Objetivo del presente trabajo es determinar el efecto de la aplicación de un activador ruminal en la producción y calidad bromatológica de la leche en una vaquería. Se seleccionaron un total de 46 vacas en ordeño (animales en producción), dichos animales se encontraban bajo las mismas condiciones de manejo, la base alimentaria principal lo constituyó el pasto. El consumo de vitafert (MEBA) mejora la producción de leche considerablemente en vacas lecheras de 10 a 100 días de lactancia. El uso del vitafert como activador ruminal aumenta la digestibilidad de los alimentos y el consumo, conllevando a un aumento en los indicadores productivos. El suplemento con vitafert constituye un ahorro de los alimentos (concentrados) importados y mejor aprovechamiento de estos. Se recomienda establecer una dieta de acuerdo a los requerimientos del animal que contenga vitafert como suplemento para la producción bovina. Suministro de concentrado en menor cuantía para incluir el vitafert en la alimentación de vacas lecheras como sustituto en parte del concentrado y ahorro de este. Continuar estudios sobre el efecto del vitafert (activador ruminal) en los indicadores productivos de las vacas lecheras.

Palabras clave: vacas lecheras, calidad de la leche, activador ruminal, vitafert.

[76] Dirección de Servicios Científicos, Universidad de Oriente (UNIVO), San Miguel, El Salvador. armando.pacheco@univo.edu.sv

Abstract

The objective of this study was to determine the effect of a ruminal activator on milk production and bromatological quality in a dairy farm. A total of 46 milking cows under the same management conditions were selected, with pasture as the main feed base. The animals were divided into two treatments of 23 cows each: Treatment 1 (3.4 kg of Norgold supplement/cow/day) and Treatment 2 (1.65 kg of Norgold + 2 liters of Vitafert/cow/day). Within each treatment, subgroups were evaluated according to lactation days (10 to 100 days and 100 to 300 days) over a 45-day period. Results showed significant differences ($p \le 0.05$) in milk production favoring the Vitafert treatment in the 10 to 100 days subgroup, reaching an average of 13.12 L/cow/day compared to 8.99 L/cow/day in the control group. No significant differences were observed in milk bromatological composition (fat, protein, lactose, total solids, and non-fat solids) or body condition for this period. In the 100 to 300 days group, there were no significant differences between treatments. Economic analysis showed that the inclusion of Vitafert increased monthly income per cow by $309.75 and generated a feed cost savings of $13.86 per animal over 45 days. It is concluded that Vitafert acts as an efficient ruminal activator that improves productive indicators in the early stage of lactation and allows substantial savings on imported concentrate.

Keywords: dairy cows, milk quality, ruminal activator, vitafert.

Introducción

La industria láctea es una de las ramas más dinámicas en el sector pecuario debido al aumento en la demanda de leche en el mundo, estimulada por los incrementos de población que existen en el planeta (Hernández & Armenteros, 2006). Aunado a esto, los consumidores exigen productos lácteos de mejor calidad, lo cual obliga a buscar opciones para cubrir tanto el volumen de demanda como los estándares de los subproductos. Por ello, se ejecutan investigaciones orientadas a estabilizar las concentraciones de los componentes lácteos principales (grasa, proteína y lactosa), dado su impacto directo en el sabor, rendimiento y propiedades sensoriales (Hernández & Ponce, 2002).

Los pastos y forrajes tropicales presentan con frecuencia deficiencias nutricionales expresadas en una baja digestibilidad de la materia seca y reducido contenido proteico, lo que limita significativamente la actividad microbiana en el rumen y compromete la producción biológica (Elías, 1983). La utilización eficiente de estos recursos forrajeros se logra cuando las poblaciones bacterianas del rumen cubren adecuadamente sus

requerimientos de energía, componentes proteicos esenciales, minerales y carbohidratos no estructurales, indispensables todos para optimizar la síntesis de proteína microbiana.

Para mitigar esta problemática, se han desarrollado alternativas mediante procesos biotecnológicos sencillos basados en el empleo de microorganismos beneficiosos activados (MEBA), como es el caso del producto comercializado como Vitafert (Elías & Herrera, 2008). Este aditivo está compuesto por lactobacilos, levaduras, ácidos orgánicos de cadena corta y un bajo pH, siendo capaz de estabilizar la fermentación, disminuir el pH ruminal, incrementar la disponibilidad proteica y elevar la digestibilidad de la materia seca al degradar con mayor eficiencia las fracciones de la pared celular de los alimentos fibrosos (Elías & Herrera, 2008; Martínez, 2002). El objetivo de este trabajo es determinar el efecto de este activador ruminal en la producción y calidad bromatológica de la leche.

Materiales y métodos

El experimento fue realizado en una vaquería típica del Instituto de Ciencia Animal de Cuba, para el mismo se seleccionaron un total de 46 vacas en ordeño (animales en producción), dichos animales se encontraban bajo las mismas condiciones de manejo, la base alimentaria principal lo constituyó el pasto.

Los animales fueron divididos en dos grupos por tratamiento (23 con suplemento norgold y 23 con 50% de suplemento norgold + vitafert), en cada grupo se separaron animales de 10 a 100 días de lactancia. Tratamiento A. Animales entre 10-100 días con consumo de 3.4kg de Norgold y Tratamiento B. Animales entre 10-100 días de lactancia con consumo de 1.65 kg de Norgold y 2 litros de Vitafer/vaca/día

Durante el experimento se ofertaron dos tratamientos en horario de ordeño 4:30 AM y 2:30 PM.Tratamiento 1: 3,4 kg de norgold por vaca por día.Tratamiento 2: 1,65 kg de norgold y 2 litros de vitafert por vaca por día.

Las evaluaciones para el experimento se realizaron en un periodo de 45 días. Los animales fueron identificados adecuadamente según tratamiento. En el trabajo se midieron las variables por raza y tratamiento: Producción de leche por vaca (L/vaca/día), Composición bromatológica de la leche por vaca y Condición corporal.

Los animales mantuvieron un seguimiento individual con la realización de pesajes a los 7 días, 14, 21, 28, 35, 42 y muestreo de la misma para obtener su composición bromatológica, al mismo tiempo se observó la condición corporal de estos animales. La composición

bromatológica se realizó en el laboratorio de rumiantes del ICA, utilizando el equipo Milko-Scan 104, A/S N. Foss Electric, Dinamarca.

Se realizó un análisis de varianza con prueba de Duncan. Los datos fueron procesados en el tabulador electrónico Microsoft Excel y analizados a través del paquete estadístico INFOSTAT.

En el análisis económico se hallaron los ingresos totales a partir de la producción de leche por dieta suministrada, en el periodo de 45 días, transcurrido el experimento, al igual se halló el costo de ambas dietas para un animal en el periodo analizado.

Resultados y discusión

En la tabla 1 se aprecian diferencias significativas para la producción de leche, a favor del tratamiento con suministro de vitafert (activador ruminal) en comparación con el tratamiento con Norgold solamente, resultados que coinciden con lo planteado por Elías y Herrera, (2008) quienes señalan que el vitafert es un activador de la fermentación que estimula la producción de ácidos orgánicos, disminuye el pH, incrementa y estabiliza la proteína, aumenta la digestibilidad de la materia seca y disminuye las fracciones de la pared celular de las materias alimentarias que se someten a su acción.

Coincidiendo con lo planteado por Pirela (2005) al señalar que un déficit de aminoácidos, NH_3 y energía reduce la síntesis de proteína microbiana, la digestibilidad y el aprovechamiento de los nutrientes, lo cual influye negativamente en el consumo y, por ende, en la producción animal.

Considerando que este producto contiene levadura como uno de sus componentes y la necesidad de esta de azúcares y almidón como fuente de energía para su metabolismo y acción sobre la estabilidad ruminal, traducido en una mejora de la eficiencia de utilización del alimento lo que conlleva a un aumento en la producción coincidiendo con Robinson y Garret (1999) quienes plantean que con la levadura, en vacas primíparas y multíparas, se mejoran los rendimientos de leche entre los 23 días y 56 días postparto, seguido de un aumento en el consumo voluntario de MS y FDN.

En el tratamiento con vitafert hay un mayor consumo debido a que aumenta la digestibilidad coincidiendo con Castro-Madrigal y Jimeno (2001) quienes plantean que con el incremento en la digestibilidad de la MS, los componentes fibrosos (FDN, FDA, hemicelulosa) y proteína bruta, existe un mayor consumo y un efecto en la producción de leche.

Cuadro 1. Resultados en la producción y composición bromatológica, en vacas de 10 a 100 días lactancia

Tabla resumen para los dos tratamientos en la alimentación con 10 a 100 días de lactancia					
Variables	Trat. 1	Trat. 2	**(±)** EE. T 1	**(±)** EE. T 2	signf
Producción	8.99	13,12	0,924	1,25	p<= 0,05
CC	3,15	3,06	0,07	0,104	NS
Grasa	3,88	3,75	0,418	0,57	NS
Proteína	2,92	3,33	0.24	0,33	NS
Lactosa	3,97	3,99	0,35	0,49	NS
ST	10,87	11,69	1,0	1,3	NS
SNG	6,94	7,89	0,6	0,8	NS

Cuando se realizó la composición bromatológica de la leche en los dos tratamientos para 10 a 100 días de lactancia, no se observó diferencia significativa en la grasa, proteína, lactosa, sólidos totales y sólidos no grasos.

El comportamiento en los valores para 100 a 300 días de lactancia se observo que no existe diferencia significativa para ninguna de las variables entre tratamientos, indicando que los mayores efectos en los animales de utilizar un activador ruminal pudieran estar en la fase inicial de la lactación.

Por otro lado, se observa un efecto significativo para la producción de leche, explicado esto a la mayor concentración según los días de lactancia y el efecto de la dieta coincidiendo con Stokes *et al.* (1991) y Elías y Herrera (2008) quienes demuestran en investigaciones realizadas que existe una correlación fuerte entre el nivel de proteína degradable en la dieta y la eficacia en la síntesis de proteína bacteriana. La eficacia máxima de síntesis de proteína bacteriana y el mayor aporte de proteína bacteriana al duodeno se alcanza en dietas que contienen entre el 10 y el 13 % de proteína degradable en la ración.

Se realizó una valoración económica en la unidad donde se reportaron mayores ingresos de la producción, para los animales que fueron alimentados con vitafert (activador ruminal) en comparación a los alimentados con norgold.

Aquellos animales a los cuales se les suministró el vitafert obtuvieron una producción media de 13.12 litros por vaca por día y en las alimentadas con norgold la media fue de 8.99 litros por vaca por día, para obtener la producción por vaca por mes se multiplicó por 30 días y se obtuvo 393.6 litros en la dieta con vitafert y 269.7 litros en la dieta con norgold, para saber el ingreso de dinero se estableció el precio de la leche a $2.50 obteniendo como ingreso, en la dieta con vitafert $ 984 y en la dieta con norgold $674.25, lo que se traduce en un aumento de los ingresos al mes para el vitafert en $309.75 por vaca.

La diferencia de precio de las dos dietas representa en ahorro:

Si de forma individual a los animales se le suministró 3.4 kg de norgold multiplicado por 45 días de duración del experimento, consumieron 153 kg del concentrado, considerando el precio del norgold a $ 0.24/kg x 153kg/45días/vaca, el costo para la alimentación de cada vaca fue de $36.72.

En la dieta con vitafert se ofertó norgold a razón de 1.65 kg/animal además de 2 litros del producto analizado (vitafert) en un periodo de 45 días, consumiendo por animal en este periodo 54 kg, la cantidad ofertada de vitafert por 45 días/vaca fue de 90 litros, considerando el precio del norgold, el costo fue de $12.96/vaca/45 días y el precio de la litro de vitafert se encuentra aproximadamente en 11centavos x 90L/V/45 días el costo fue de $ 9.9, lo que sumado a 12.96 de norgold representa $22.86.

La diferencia entre las dos dietas es de $ 13.86 obteniendo ahorros en la dieta con vitafert.

Conclusiones

El consumo de vitafert (activador ruminal) mejora la producción de leche considerablemente en vacas lecheras de 10 a 100 días de lactancia.

Existe un incremento por raza en la composición bromatológica de la leche cuando las vacas son alimentadas con vitafert entre los 100 y 300 días de lactancia.

El uso del vitafert como activador ruminal aumenta la digestibilidad de los alimentos y el consumo, reflejando un aumento en los indicadores productivos.

El suplemento con vitafert constituye un ahorro de los alimentos (concentrados) importados y mejor aprovechamiento de estos.

Recomendaciones

Establecer una dieta de acuerdo con los requerimientos del animal que contenga vitafert como suplemento para la producción bovina.

Suministro de concentrado en menor cuantía para incluir el vitafert en la alimentación de vacas lecheras como sustituto en parte del concentrado y ahorro de este.

Continuar estudios sobre el efecto del vitafert (activador ruminal) en los indicadores productivos de las vacas lecheras.

Literatura citada

Calsamiglia, S., & Endres, M. I. (1994). Dinámica del metabolismo de los hidratos de carbonos y el nitrógeno del rumen. En: *X curso de especialización FEDNA. Avances en nutrición y alimentación animal*. Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal.

Elías, A. (1983). Digestión de pastos y forrajes tropicales. En: *Los pastos en Cuba*. Tomo 2. Instituto de Ciencia Animal. Cuba. pp. 187-247.

Elías, A., & Herrera, F. R. (2008). Producción de alimentos para animales a través de procesos biotecnológicos sencillos con el empleo de microorganismos beneficiosos activados (MEBA). *Informe Técnico, Instituto de Ciencia Animal*, pp. 8-13.

Hernández, A. (2009). *Caracterización del genotipo lechero Mambí de Cuba* (Tesis de Doctorado). Instituto de Ciencia Animal, La Habana, Cuba.

Hernández, R. R., & Armenteros, A. M. (2006). *Manual de lechería*. p. 68.

Hernández, R., & Ponce, P. (2002). Estudio de la composición de la leche en las condiciones actuales del trópico en Cuba. *Revista Salud Animal*, 24(2), 111-114.

Martínez, R., Tuero, R., & Torres, V. (2010). Modelos de acumulación de biomasa y calidad en las variedades de hierba elefante, Cuba CT-169, OM-22 y king grass durante la estación lluviosa en el occidente de Cuba. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 44(2).

Martínez, E. (2002). *Microdosis, situación en el 2002*. Universidad Autónoma de Zacatecas, México. Disponible en: http://www.campusveterinariosenweb.com/file.php/1/moddata/forum/14/51429/Microdosis_2002.doc.

Ribas, M., Ponce, R., Ajete, A., Mederos, R. E., Gutiérrez, M., Mora, M., Guzmán, G., Évora, J. C., González, S., & Sosa, E. (2001). *Mejoramiento Genético de la producción de leche bovina bajo las condiciones actuales de producción* (Informe Técnico). 117 p. Mimeo.

Vera, R., & Seré, C. (1985). Los sistemas de producción pecuaria extensiva del trópico sudamericano. Análisis comparativo. En: Vera, R. y Seré, C. (Eds.), *Sistemas de producción pecuaria extensiva: Brasil, Colombia y Venezuela*.

TEMÁTICA 12. SOCIOECONOMÍA, MERCADO, DESARROLLO RURAL, CLIMATOLOGÍA Y EDUCACIÓN

Análisis del desarrollo comunitario sostenible del Ejido el Diez, Chihuahua

Arely Shirley Viaña Macías[77], María Elvira González Anchondo[78], Fabiola Iveth Ortega Montes[79], José Eduardo Magaña Magaña[80]

Resumen

Se implementó el modelo de planeación estratégica participativa para el desarrollo comunitario desarrollado por el INCA RURAL en la comunidad del Ejido El Diez, Delicias, Chihuahua. El propósito de este trabajo fue diseñar un plan de acción comunitario que priorice las necesidades, promueva la autogestión y genere oportunidades para el desarrollo económico de la comunidad a través la identificación de proyectos. Fue un enfoque cualitativo y descriptivo, se realizó un taller de planeación estratégica participativa con cuatro mesas de trabajo: sociocultural, natural, capital humano y económico. Se identificó y priorizó once proyectos estratégicos mismos que a través de una asamblea general de la comunidad se validaron. La planeación estratégica participativa representa una metodología especializada para identificar, priorizar y consensuar necesidades apremiantes para las comunidades como el caso del Ejido El Diez, permitiendo la elaboración de un plan de acción acorde a las circunstancias económicas, productivas, sociales y naturales de la comunidad e integrar estos proyectos a las convocatorias municipales, estatales y federales que apoyan el desarrollo rural.

Palabras clave: Desarrollo sostenible, comunidades rurales, fortalecimiento, cohesión social.

[77] Estudiante de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales de la UACH, km. 2.5 carretera a Rosales, poniente, 33000 Delicias, Chih., aviaña@gmail.mx
[78] Profesor Investigador de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales de la UACH, km. 2.5 carretera a Rosales, poniente, 33000 Delicias, Chih., elviragonzalez@uach.mx
[79] Profesor Investigador de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales de la UACH, km. 2.5 carretera a Rosales, poniente, 33000 Delicias, Chih., fortega@uach.mx
[80] Profesor Investigador de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales de la UACH, km. 2.5 carretera a Rosales, poniente, 33000 Delicias, Chih., emagana@uach.mx

Abstract

The participatory strategic planning model for community development, developed by INCA RURAL, was implemented in the community of Ejido El Diez, Delicias, Chihuahua. The purpose of this work was to design a community action plan that prioritizes needs, promotes self-management, and generates opportunities for the community's economic development through project identification. A qualitative and descriptive approach was used, and a participatory strategic planning workshop was held with four working groups: sociocultural, natural, human capital, and economic. Eleven strategic projects were identified and prioritized, and then validated through a general community assembly. Participatory strategic planning represents a specialized methodology for identifying, prioritizing, and reaching consensus on pressing needs for communities like Ejido El Diez, enabling the development of an action plan tailored to the community's economic, productive, social, and natural circumstances and integrating these projects into municipal, state, and federal funding opportunities that support rural development.

Key words: Sustainable development, strengthens social, cohesion sustainability rural communities.

Introducción

Las comunidades rurales en México enfrentan desafíos multidimensionales, como pobreza, falta de infraestructura y acceso limitado a servicios básicos. El Ejido El Diez, con 385 habitantes, ejemplifica estas problemáticas: el 25.8% de su población vive en pobreza extrema, el 18% de adultos es analfabeta y el 58.5% carece de educación básica completa. A pesar de los esfuerzos de entidades gubernamentales por sopesar estos desafíos mediante la aplicación de programas, la escaza participación de sus habitantes afecta su efectividad.

La Organización de las Naciones Unidas (ONU), establece 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como estrategia para sostenibilidad de las naciones. Sin embargo, algunos países, entre ellos México, aún no han logrado el cumplimiento en su totalidad en ninguno de ellos. Aquellos con mayor avance son los objetivos relacionados con Salud y Bienestar (ODS 3), Agua Limpia y Saneamiento (ODS 6), Ciudades y Comunidades Sostenibles (ODS 11) representando un nivel de cumplimiento al 75%. Con la finalidad de fortalecer el alcance y aplicación de la Agenda 2030, el Gobierno de México, instauró el Consejo Nacional de la Agenda 2030, para la coordinar las acciones entre todos instituciones y sectores involucrados (Sachs et al., 2024; Gobierno de México, 2024).

En este estudio se consideran al menos tres de los diecisiete de la ONU, en específico salud y bienestar (ODS 3), reducción de las desigualdades (ODS 10) y alianzas para el desarrollo (ODS 17). La planeación estratégica participativa surge como un instrumento para la autogestión de los habitantes, integren sus conocimientos y garanticen alternativas de solución estratégicas. De manera que, el objetivo de esta investigación fue diseñar un plan de acción comunitario que priorice las necesidades, promueva la autogestión y genere oportunidades para el desarrollo económico de la comunidad a través la identificación de proyectos.

Las políticas de desarrollo rural por el Banco Mundial (2023), para lograr el desarrollo rural: "De la visión a la acción", el Banco Mundial implementa esta estrategia para el sector rural la cual describe las medidas que el Banco y sus socios deben tomar para impulsar el desarrollo rural.

Los elementos clave de la estrategia incluyen;

(a) Adoptar un enfoque rural amplio, en lugar de un enfoque limitado en el sector agrícola.

(b) Involucrar a todo el Grupo del Banco Mundial en la promoción del desarrollo rural.

(c) Trabajar con los países socios y la comunidad internacional en general. Integrando el desarrollo rural en las estrategias generales de desarrollo del país

d) Abordar viejos problemas de nuevas maneras.

Las cinco áreas de concentración y demanda futura son la estrategia rural y la formulación de políticas; intensificación de los sistemas agrícolas; gestión de recursos naturales y silvicultura; asignación y gestión del agua; y desarrollo local y comunitario e infraestructura rural.

El éxito de la estrategia del sector rural se juzgará por tres resultados principales: la reducción de la pobreza rural y una mejor gestión de los recursos naturales; mayor dependencia de los mercados internacionales para la seguridad alimentaria, así como salidas rentables para mejorar la producción agrícola; y un menor número de personas con bajo rendimiento y abandonos escolares en las zonas rurales.

Dentro de los proyectos aprobados por el Banco Mundial en el 2023 para México, dentro de los objetivos de desarrollo del Préstamo para Políticas de Desarrollo de Crecimiento

Económico Inclusivo y Sostenible en México incluyen medidas de política de las autoridades que:

(a) Apoyan a grupos y regiones vulnerables para cosechar los beneficios de la recuperación económica.

(b) Reformar políticas e instituciones clave que permitan un crecimiento económico sostenible.

En América Latina las zonas rurales han experimentado diversas transformaciones en las últimas décadas, como: la consolidación de ciudades, vinculación entre espacios urbanos y rurales, además de la diversificación de actividades productivas económicas (Fernández et al., 2019; CEPAL, 2023). Así como, la migración de los jóvenes hacia las ciudades, provocando que la población de las comunidades rurales sea de adultos mayores y cambiando la estructura de fuerza laboral y procesos de producción (FAO, 2023).

El aumento de la demanda de alimentos y consecuencias del cambio climático han apresurado la necesidad de promover estrategias para el desarrollo rural sostenible, que garanticen la seguridad alimentaria, la participación de los jóvenes en el territorio y la conservación de los recursos naturales (FAO, 2023; ONU, 2015).

Materiales y métodos

El estudio empleó un diseño no experimental transversal con enfoque mixto (cualitativo-cuantitativo), siguiendo la metodología del programa INCA Rural (2020): en la primera etapa se realizó un taller de planeación estratégica participativa con los ejidatarios y avecindados de la comunidad. El objeto fue identificar los problemas y potencialidades mediante un análisis de fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas que los participantes identificaron, así mismo se aplicó un instrumento estructurado para medir la percepción de las necesidades de la comunidad en los ejes: natural, capital humano, sociocultural y económico (cuadro 1).

Cuadro 1. Ejes estratégicos de Planeación estratégica participativa

Ejes estratégicos: Problemas y potencialidades	
Natural: Ubicación geográfica, uso y tipo de suelo, relieve, clima, precipitación, tipo de vegetación, especies endémicas, áreas naturales protegidas, antecedentes de recursos naturales y de utilización de tecnologías sostenibles y actores clave en el territorio	Capital humano: Caracterización de individuos y familias, indicadores de educación por sexo y edad, de salud, servicios en la vivienda, composición de la población, migración, alimentación en la familia y actores clave en el territorio
Sociocultural: Caracterización de recursos sociales (personas que integran organizaciones y redes de beneficio común), rasgos culturales, organización de productores y comités comunitarios, planes y programas gubernamentales, conflictos agrarios, grupos indígenas e idiomas y actores clave.	Económico: Actividades productivas existentes, ciclos y calendarios de producción, rendimientos de cultivos, agricultura y ganadería de traspatio, costos de producción agrícola y pecuaria, canales de comercialización, infraestructura, maquinaria y equipo, actividades turísticas, régimen de propiedad sobre la tierra y actores clave.

Fuente: INCA RURAL (2020)

En la segunda etapa se trabajó en talleres y se priorizaron las acciones a realizar, clasificándolas en los ejes natural, sociocultural, económico y humano. Obteniendo un diagnóstico con los datos recabados, y se priorizaron las acciones. La tercera etapa consistió en el diseño del plan de acción prioritario, con la elaboración de fichas técnicas para cada estrategia, con indicadores de línea base y metas. Así mismo, se llevó a cabo la validación comunitaria, a través de mesas de trabajo y consultas con autoridades locales. Se finaliza con la cuarta etapa, donde se redactó el plan completo y su presentación para los gobiernos municipal y estatal e interesados.

Resultados y discusión

El Ejido El Diez, es una comunidad que pertenece al Municipio de Delicias, situada a 7.3 kilómetros de Delicias, Chihuahua, a una altitud de 1,217 metros SNM y se encuentra en las coordenadas: Longitud: -105.483889, Latitud: 28.128889. El total de habitantes es de 385 de los cuales 193 son hombres y 192 son mujeres. El 43% son menores y el 57% son adultos.

La comunidad de El Diez cuenta con áreas agrícolas de riego y ganado doméstico. Sus tradiciones y festividades son similares a las de Delicias, destacándose la feria y fiesta patronal con carreras de caballos y charrería. Se ha formado un comité dentro de la asamblea del ejido para apoyar el desarrollo comunitario. La economía local se basa en la agricultura y ganadería de baja escala, principalmente para autoconsumo, con algunos habitantes rentando sus tierras a productores de Delicias y Rosales. El ganado bovino y caprino, así como las aves domésticas, son comunes, y se cultivan maíz y hortalizas. A pesar del capital humano dedicado a diversas actividades, la falta de infraestructura y empleo limita el desarrollo de los habitantes, que en su mayoría trabajan en empresas de Delicias o ranchos cercanos. Mejorar las calles, construir espacios de recreación, una granja comunitaria y habilitar el centro de salud son inversiones clave para el desarrollo del ejido.

Dentro de los resultados se detectó como prioritario la aportación de infraestructura, una propuesta de pavimentar 3 km de carreteras para conectar el ejido con rutas de transporte público (beneficiando a 70-100 familias). Reducción potencial del 30% en accidentes viales y mejora en accesibilidad. En el eje Salud, la creación de un centro de salud con capacidad para atender al 100% de la población, incluyendo programas de prevención y capacitación médica. Para favorecer la economía local se propuso el establecimiento de granjas comunitarias (avícola y porcina) para 30 productores, con proyección de aumentar ingresos en un 40% mediante comercialización directa. En capital humano, se propone la creación de un centro comunitario para actividades educativas y culturales, incrementando la participación ciudadana del 50% al 75%, y en el eje educación, reducción del analfabetismo del 18% al 10% mediante programas de alfabetización a realizarse en el centro comunitario.

Como resultados de los talleres se tienen el diagnóstico del Ejido el Diez como se muestra en el cuadro 2.

Cuadro 2. Diagnóstico de la comunidad

Proyectos de Desarrollo	Estrategias y Acciones	Problemática que resuelve y/o potenciales asociados	Indicadores de línea de base
Pavimentación de carreteras y caminos	Pavimentar calles y carreteras que contribuyan a una mejor movilidad y flujo de personas y mercancías.	Tiempos de traslado grande, hogares con polvo, escaso flujo de mercancías, todo ello debido a las malas condiciones de calles y carreteras.	Valor de línea base: 20%.
Rehabilitación de los canales de distribución	Rehabilitación de canales de distribución de riego para 700 ha en el Ejido El Diez.	El abandono y desuso de los canales de riego ha provocado que la infraestructura hidráulica se encuentre en condiciones deficientes, causando que el 50% de los ejidatarios que siguen sembrando presenten menores rendimientos en sus cosechas.	Nombre: Aprovechamiento total del sistema hidráulico (caudal de riego). Valor de línea base: cero. Nombre: Superficie de hectáreas agrícolas con acceso a riego. Valor de línea base: cero.
Microindustria de carne y queso	Implementar una microindustria para el procesamiento de los productos cárnicos y productos lácteos de la región.	El ejido cuenta con aproximadamente 300 cabezas de ganado bovino, a las que no se les está dando valor agregado y solo se venden como producto básico; sin embargo, la carne y la leche se pueden procesar, con lo que se incrementarán los ingresos a las 90 familias de los ejidatarios de la comunidad.	Nombre: Familias que le dan valor agregado a la carne y a la leche. Valor de línea base: cero. Nombre: Número de familias que le dan valor a la carne y leche. Valor de línea base: cero.
Curso taller de procesamiento de productos cárnicos y lácteos	Implementar un taller de procesamiento de productos cárnicos y lácteos, para capacitar a los integrantes de las familias del Diez.	El ejido cuenta con aproximadamente 300 cabezas de ganado bovino, a las que no se les está dando valor agregado y solo se venden como producto básico; sin embargo, la carne y la leche se pueden procesar, con lo que se incrementarán los ingresos a las	Nombre: Talleres a las familias para que le den valor agregado a la carne y a la leche. Valor de línea base: cero. Nombre: Familias capacitadas para dar valor a la carne y leche. Valor de línea base: cero.

		90 familias de los ejidatarios de la comunidad.	
Curso taller de agronegocios	Implementar un taller de gestión y administración de agronegocios, para capacitar a los integrantes de las familias del Ejido El Diez.	Dotar de conocimientos necesarios a los habitantes de la comunidad sobre aspectos básicos de agronegocios que les permitan la gestión y manejo de sus negocios locales.	Nombre: Familias asistentes a la capacitación de agronegocios. Valor de línea base: cero.
Talleres de prevención de adicciones y enfermedades	Implementar un taller para la prevención de adicciones y enfermedades en la comunidad del Diez.	Disminución de índices de drogadicción y enfermedades en la comunidad del Diez.	Nombre: Porcentaje de la población local que participa en los cursos-talleres. Valor de línea base: cero. Nombre: Porcentaje de disminución en indicadores de adicciones y enfermedades. Valor de línea base: cero.
Construcción del centro comunitario	Construir un centro comunitario. Diseñar programas educativos y de capacitación laboral para la comunidad del Diez.	Proporcionar acceso a programas educativos y de capacitación laboral, crear un espacio donde las personas puedan reunirse, albergar clínicas de salud y reducir la delincuencia.	Nombre: Porcentaje de la población local que participa en actividades comunitarias regulares. Valor de línea base: 20%. Nombre: Porcentaje de satisfacción y percepción del impacto del centro en sus vidas. Valor de línea base: cero.
Remodelar la infraestructura del centro de salud	Remodelación del centro de salud.	La comunidad cuenta con muchas enfermedades como problemas respiratorios, cáncer, desnutrición, enfermedades en la piel, así como otras enfermedades causadas por la contaminación que existía por la mina en el ambiente y por el agua contaminada. La problemática es que no se cuenta con una infraestructura adecuada ni	Nombre: Más del 90% de la población del Ejido El Diez que da el número de citas atendidas. Valor de línea base: cero.

		personal, por lo que la remodelación permitiría brindar atención digna y de calidad. La remodelación afecta al 90% de la población del Diez que utiliza el centro de salud, el cual se encuentra en malas condiciones.	
Reparación, rehabilitación y renovación de la infraestructura hidráulica del Ejido El Diez	Reparar, rehabilitar y renovar la infraestructura. Participar en un programa gubernamental solicitando recursos para el acondicionamiento de la infraestructura hidráulica.	El abandono y desuso de los canales de riego ha provocado que la infraestructura hidráulica se encuentre en condiciones deficientes, causando que el 50% de los ejidatarios que siguen sembrando presenten menores rendimientos en sus cosechas.	Nombre: Rehabilitación de la unidad de riego del ejido (caudal de riego). Valor de línea base: X litros de agua. Nombre: Superficie de hectáreas agrícolas con acceso a riego. Valor de línea base: X superficie.
Curso capacitación para actualización de reglamento del ejido	Adecuar y actualizar el reglamento interno del grupo ejidal y capacitar a los ejidatarios para concientizarlos de la importancia de la participación en las asambleas ejidales.	La inasistencia de los ejidatarios a las juntas ejidales y contar con un reglamento.	Nombre: Actualización de reglamento. Valor de línea base: cero. Nombre: Asamblea ejidal con reglamento y lineamientos adecuados. Valor de línea base: cero.

Fuente: elaboración propia.

La participación de los habitantes del Ejido el Diez en el proceso de planeación participativa para el desarrollo fortalecerá el capital humano a través de capacitaciones en técnicas agrícolas, gestión cooperativa y desarrollo sostenible. Esto permitirá a los habitantes mejorar sus habilidades y conocimientos, fomentando un sentido de propiedad y responsabilidad sobre los recursos comunitarios. Se prevé que la implementación de los proyectos resultantes del diagnóstico lleve a la mejora de la infraestructura esencial en el Ejido el Diez, como la rehabilitación de canales de riego, la mejora de las carreteras locales y el desarrollo de sistemas de agua potable y drenaje.

Al identificar las potencialidades locales, se obtuvo que la producción de la goma de mezquite y carbón, se espera lograr la diversificación en las actividades económicas productivas del Ejido, establecer nuevas cooperativas e incorporar prácticas sostenibles en el manejo agrícola para propiciar la generación de empleo y mejorar la calidad de vida de sus habitantes en el mediano y largo plazo.

Conclusiones

Se concluye que la planeación participativa representa una metodología especializada para identificar, priorizar y consensuar necesidades apremiantes para el Ejido el Diez, permitiendo la elaboración de un plan de acción acorde a las circunstancias económicas, productivas, sociales y naturales de la comunidad.

Con la realización del taller (figura 1) se identificaron las principales limitaciones para el desarrollo comunitario, así como, la necesitad de una participación local y de entidades gubernamentales para la mejora en infraestructura estratégica, fortalecimiento del capital humano, aprovechamiento sostenible de los recursos y la diversificación de sus actividades económico-productivas. Del mismo modo, la vinculación de los ODS a las problemáticas identificadas hace posible el diseño de un plan de desarrollo que cumpla lineamientos y metas internacionales en materia de sostenibilidad económica, social y ambiental.

Los resultados obtenidos del Ejido el Diez son prueba de la aplicabilidad de un modelo de planeación estratégica participativa, el cual permite la autoevaluación de los habitantes de una comunidad se transforme en conocimiento para abordar las limitantes de manera estratégica, aprovechando las potencialidades de las comunidades. Además, la toma de decisiones colectivas favorece una visión de desarrollo e incrementa la suma de esfuerzos para conseguirla.

La sostenibilidad de un plan de acción no depende sólo de la disponibilidad de recursos naturales y financieros, si no de que los interesados, miembros de la comunidad y entidades gubernamentales correspondientes den continuidad a los procesos de participación activa y mecanismos de seguimiento y evaluación. No es una tarea de unos cuantos, sino una tarea de todos.



Figura 1. Mesa de trabajo del eje natural en el Ejido el Diez

Literatura citada

Aguado Puig, A. (2018). Desarrollo Sostenible: 30 años de evolución desde el informe Brundtland. [Tesis de doctorado, Universidad de Sevilla] Archivo digital. Desarrollo sostenible: 30 años de evolución desde el informe Brundtland - Dialnet

Ayres Wendy, S. F. (2002). Rural development - from vision to action. World Bank. https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/445541468326432599/rural-development-from-vision-to-action

Banco Mundial. (2023). México promoviendo las oportunidades económicas de las mujeres y el crecimiento sostenible de la productividad DPL. https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/projects-home

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (2023). Panorama Social de América Latina y el Caribe 2023. CEPAL. https://www.cepal.org/es/publicaciones

Fernández L., J., Fernández, M. I., & Soloaga, I. (2019). Enfoque territorial y análisis dinámico de la ruralidad: alcances y límites para el diseño de políticas de desarrollo rural innovadoras en América Latina y el Caribe. Repositorio CEPAL, https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/8a34171e-fe47-468f-afff-3404b329ad1f/content

Fernández, L., Trejos, D., Valdés, A., & Ramírez, E. (2019). La evolución de las estructuras agrarias y los desafíos para el desarrollo rural en América Latina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/

Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Fund for Agricultural Development, Pan American Health Organization, World Food Programme, & United Nations Children's Fund. (2023). Panorama regional de la seguridad alimentaria y la nutrición en América Latina y el Caribe 2023. FAO. https://doi.org/10.4060/cc8514es

Gobierno de México. (2024). México avanza en la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, presenta Cuarto Informe Nacional Voluntario. Secretaría de Economía. https://www.gob.mx/se/prensa/mexico-avanza-en-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible-presenta-cuarto-informe-nacional-voluntario

Herrera Tapia F. (2012). DESARROLLO RURAL EN MÉXICO POLÍTICAS Y PERSPECTIVAS https://iapem.edomex.gob.mx/editorial/revistas/2012LDRMPP.pdf

INCA RURAL. (2020). Planeación participativa para el desarrollo comunitario, guía metodológica. 08.pdf (www.gob.mx)

INEGI. Censo Población y Vivienda. (2020). Rural y urbana. https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P

INEGI. Localidades rurales de México del (MG). (2020). http://idegeo.centrogeo.org.mx/. http://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode%3Aloc_puntuales_mex_2020

Ministerio de Desarrollo Social de Chile. (2019). Guía metodológica para la elaboración de diagnósticos socioeconómicos locales. https://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl

Naciones Unidas. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. https://sdgs.un.org/es/2030agenda

Quiroz Gómez, J. (2021). "Las paradojas del desarrollo comunitario. Plan Nacional de Desarrollo 2018-2024 en México". Revista Internacional de Cooperación y Desarrollo. 8(1), 28-38. https://revistas.usb.edu.co/index.php/Cooperacion/article/view/5206/3906

Sachs, J. D., Lafortune, G., Fuller, G., & Drumm, E. (2024). Sustainable Development Report 2024: The Sustainable Development Goals and the UN Summit of the Future. Dublin University Press. https://doi.org/10.25546/108572

SAGARPA, De Agricultura y Desarrollo Rural, S. (2023). Desarrollo Rural, la esperanza del campo. gob.mx. https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/desarrollo-rural-la-esperanza-del-campo

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022) Programa Sectorial de Agricultura y Desarrollo Rural 2020-2024: https://www.gob.mx/agricultura/documentos/programa-sectorial-de-agricultura-y-desarrollo-rural-2020-2024

United Nations. (2016). Objetivos de desarrollo sostenible | Naciones Unidas. https://www.un.org/es/impacto-acad%C3%A9mico/page/objetivos-de-desarrollo-sostenible

Análisis estratégico de mercado del centro-sur de Chihuahua para productos derivados de nopal (*Opuntia spp*.)

Arely Sofia Ontiveros Rodríguez[81], José Eduardo Magaña Magaña[82]*, María Guadalupe Macías López[83], María del Rosario Baray Guerrero[84]

Resumen

El nopal (*Opuntia spp.)* es un cultivo estratégico cultural y alimenticio en México. En el norte del país el nopal es utilizado como verdura y como forraje. La condición de posicionamiento en el consumidor es su relación con el control de la diabetes. De diez consumidores de nopal verdura ocho manifiestan su consumo para controlar, en su caso, la diabetes. La oportunidad de mercado en el consumo de snacks con un producto a base de nopal para sustituir las tradicionales botanas y dulces es el principal objetivo de medir analizar para desarrollar productos a base de nopal en el mercado del centro sur del estado de Chihuahua. El estudio se desarrolló mediante un enfoque mixto, de tipo descriptivo y corte transeccional, mediante la aplicación de un cuestionario estructurado de 17 preguntas, con un tamaño de muestra de 387 consumidores potenciales en el que se analizaron hábitos de consumo, preferencias y disposición de compra. Los resultados mostraron que los consumidores jóvenes de 16 a 25 años y adultos jóvenes de 26 a 35 años representan el principal segmento de mercado, con mayor aceptación hacia productos como gomitas y papitas de nopal. Los atributos más valorados de los productos fueron sabor, precio y tamaño o porción. En cuanto a los canales de comercialización las tiendas de la esquina y tiendas de autoservicio se identificaron como los principales. Asimismo, el 63.8% de los consumidores manifestó disposición de compra en rangos de precio entre $15 y $25 pesos.

Palabras clave: botanas saludables, gomitas, paletas, posicionamiento de mercado, nopal verdura.

Abstract

[81] Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Km 2.5 Carretera Delicias a Rosales, Campus Delicias. Delicias, Chih. México C.P.33000. Correo: p330732@uach.mx
[82] Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Km 2.5 Carretera Delicias a Rosales, Campus Delicias. Delicias, Chih. México C.P.33000. Correo: emagana@uach.mx
[83] Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Km 2.5 Carretera Delicias a Rosales, Campus Delicias. Delicias, Chih. México C.P.33000. Correo: macias519@gmail.com
[84] Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Km 2.5 Carretera Delicias a Rosales, Campus Delicias. Delicias, Chih. México C.P.33000. Correo: rbaray@uach.mx

The nopal (Opuntia spp.) is a strategic crop, both culturally and nutritionally, in Mexico. In the north of the country, it is used as a vegetable and as animal fodder. Its positioning among consumers is based on its association with diabetes management. Eight out of ten consumers of nopal as a vegetable cite its use for managing diabetes. The market opportunity for nopal based snacks, intended to replace traditional snacks and sweets, is the main objective of this study, which aims to measure and analyze the development of based products in the south-central region of the state of Chihuahua. The study employed a mixed-methods approach, using a descriptive, cross-sectional design. A structured questionnaire of 17 questions was administered to a sample of 387 potential consumers, analyzing their consumption habits, preferences, and purchasing intent. The results showed that young consumers aged 16 to 25 and young adults aged 26 to 35 represent the main market segment, demonstrating the greatest acceptance of products such as nopal gummies and potato chips. The most valued product attributes were flavor, price, and size or portion size. Regarding distribution channels, corner stores and supermarkets were identified as the main ones. Furthermore, 63.8% of consumers expressed a willingness to purchase products priced between $15 and $25 pesos.

Keywords: healthy snacks, gummies, lollipops, market positioning, nopal vegetable.

Introducción

La industria alimentaria ha experimentado importantes transformaciones derivadas de cambios en los hábitos de consumo y de una creciente preocupación por la salud y la sostenibilidad. Actualmente, los consumidores muestran mayor interés por alimentos funcionales y opciones nutricionalmente equilibradas, especialmente dentro del mercado de snacks saludables (Cammarelle *et al*., 2025). Sin embargo, gran parte de la oferta continúa conformada por productos ultraprocesados con altos contenidos de azúcares, grasas saturadas y sodio, asociados con enfermedades crónicas como obesidad, diabetes e hipertensión (Wein, 2024).

En México, el mercado de botanas representa uno de los sectores más dinámicos de la industria alimentaria debido a la alta frecuencia de consumo y a la preferencia por productos prácticos y accesibles. Aun así, el predominio de alimentos ultraprocesados muestra la necesidad de desarrollar alternativas que integren valor nutricional sin sacrificar sabor y conveniencia. Estudios recientes señalan que las decisiones de compra de snacks saludables están influenciadas principalmente por factores como sabor, precio y experiencia sensorial (Van Kleef *et al.*, 2012). De esta forma, el consumidor moderno tiende a valorar productos

asociados con bienestar, sostenibilidad y naturalidad, especialmente entre los segmentos jóvenes y urbanos (Asioli *et al*., 2017).

Los snacks saludables pueden definirse como alimentos de consumo rápido formulados con ingredientes que aportan beneficios nutricionales y funcionales superiores a los productos tradicionales. Este tipo de alimentos forma parte de la tendencia global hacia los llamados alimentos funcionales, que además de cubrir necesidades básicas de alimentación, contribuyen favorablemente a la salud y prevención de enfermedades (Granato *et al*., 2020).

El nopal ha despertado interés comercial como ingrediente potencial para el desarrollo de alimentos funcionales y sostenibles, ya que representa una alternativa agroalimentaria estratégica por sus propiedades nutricionales, funcionales y ambientales. Esta planta originaria de México posee alto contenido de fibra dietética, antioxidantes, vitaminas y minerales, además de una gran capacidad de adaptación a climas áridos y semiáridos con bajo requerimiento hídrico (Sáenz, 2007).

Diversas investigaciones han demostrado que el nopal posee propiedades benéficas para la salud relacionadas con el control glucémico, reducción del colesterol y mejoramiento de procesos digestivos debido a su contenido de compuestos bioactivos y fibra soluble (El-Mostafa *et al*., 2014).

La aceptación del consumidor hacia productos elaborados a base de nopal también ha sido abordada en investigaciones recientes. De Albuquerque *et al*. (2019) encontraron que consumidores brasileños mostraron una gran aceptación hacia productos elaborados con nopal aun cuando este ingrediente no forma parte de su cultura alimentaria tradicional. Asimismo, de Albuquerque *et al*. (2022) identificaron que la comunicación de beneficios funcionales influye significativamente en la aceptación sensorial y la intención de compra de productos derivados de este cultivo. La incorporación de ingredientes funcionales tradicionales en formatos modernos de consumo facilita la aceptación de nuevos productos alimenticios entre consumidores jóvenes.

De esta manera, la aceptación de nuevos productos alimenticios depende de factores psicológicos, culturales y sensoriales relacionados con las preferencias, experiencias previas y percepciones de valor del consumidor (Kotler y Keller, 2016). En el caso de los snacks saludables, variables como sabor, textura, precio, empaque y percepción de naturalidad influyen directamente en la intención de compra y recompra (Crofton *et al*., 2013). Por ello, el diseño estratégico de productos innovadores requiere comprender integralmente las motivaciones y expectativas del mercado objetivo.

Por otra parte, el desarrollo de start-ups agroalimentarias ha adquirido relevancia como mecanismo para transformar recursos regionales en propuestas de valor innovadoras y sostenibles. Las start-ups se caracterizan por operar bajo modelos de negocio flexibles orientados a la innovación, diferenciación y rápida adaptación al mercado (Blank y Dorf, 2020). En el sector alimentario, estas empresas representan una oportunidad para impulsar productos funcionales y sostenibles mediante estrategias centradas en las necesidades del consumidor y en la generación de valor agregado a productos agrícolas locales. Diversos estudios señalan que las start-ups agroalimentarias desempeñan un papel relevante en la innovación de sistemas alimentarios sostenibles al promover productos diferenciados, modelos de negocio flexibles y aprovechamiento eficiente de recursos regionales (El Bilali y Allahyari , 2018).

A pesar del reconocimiento científico de las propiedades del nopal y del crecimiento del mercado saludable, existe un vacío de investigación relacionado con el análisis estratégico de mercado para start-ups enfocadas en snacks derivados de este cultivo. La mayoría de las investigaciones se han concentrado en aspectos nutricionales y funcionales, dejando limitada evidencia sobre variables comerciales como intención de compra, percepción del precio, preferencias de sabor y estrategias de posicionamiento (Crofton *et al*., 2013).

La importancia de abordar esta problemática radica en la necesidad de desarrollar alternativas alimenticias innovadoras que contribuyan a la salud del consumidor y al aprovechamiento sostenible de recursos regionales. De acuerdo con Aparicio y Olvera (2023) los modelos de negocio orientados a la innovación y al aprovechamiento de la biodiversidad regional pueden generar ventajas competitivas sostenibles y fortalecer el ecosistema emprendedor local. Por lo que el desarrollo de una start-up dedicada a snacks derivados de nopal representa una oportunidad para agregar valor a la producción agrícola regional y responder a las nuevas tendencias de consumo saludable.

El objetivo es realizar un análisis estratégico de mercado para productos derivados de nopal *(Opuntia spp.)* mediante la aplicación de un cuestionario a consumidores de snacks en Delicias, Chihuahua, con la finalidad de identificar preferencias de consumo, aceptación comercial y oportunidades potenciales para el diseño y operación de una start-up enfocada en la comercialización de snacks saludables.

Se sustenta en los enfoques de comportamiento del consumidor, innovación alimentaria y modelos de negocio para emprendimientos emergentes. Estos enfoques permiten comprender

los factores que influyen en la aceptación de nuevos productos y en la construcción de propuestas de valor competitivas dentro del mercado alimentario.

De manera específica, se busca analizar los hábitos de consumo y preferencias de los consumidores respecto a los snacks, considerando aspectos como frecuencia de consumo, características valoradas y lugares de compra. Asimismo, se pretende evaluar la aceptación y disposición de compra de diferentes productos elaborados a base de nopal, así como identificar información estratégica relacionada con percepción de beneficios saludables, disposición a pagar y oportunidades de posicionamiento comercial en el mercado local.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló en la ciudad de Delicias, Chihuahua, México, región reconocida por su actividad agroindustrial y dinamismo económico. Delicias destaca por su relevancia dentro del sector agrícola estatal debido a la producción de diversos cultivos y al desarrollo de actividades agroindustriales que favorecen la innovación y el emprendimiento regional. Este contexto resulta adecuado para el análisis de productos alimenticios funcionales y propuestas de negocio relacionadas con el aprovechamiento de recursos agrícolas locales (SIAP, 2024).

Se desarrolló bajo un enfoque metodológico mixto, integrando métodos cuantitativos y cualitativos con el propósito de obtener una visión integral del mercado potencial de snacks saludables derivados de nopal. El enfoque cuantitativo permitió recopilar información medible relacionada con hábitos de consumo, preferencias y disposición de compra, mientras que el enfoque cualitativo facilitó interpretar percepciones e intereses de los consumidores respecto a este tipo de productos.

El tipo de investigación fue descriptivo, debido a que se enfocó en identificar y analizar las características del mercado objetivo, hábitos de consumo y preferencias de los consumidores potenciales frente a snacks saludables derivados de nopal. Las investigaciones descriptivas permiten especificar propiedades y características de grupos o fenómenos determinados sin manipular variables (Hernández-Samperi y Mendoza-Torres, 2018).

Asimismo, el diseño de investigación fue transeccional o transversal, ya que la recopilación de información se realizó en un único momento temporal mediante la aplicación de cuestionarios a consumidores potenciales. Según Bernal (2016), los estudios transeccionales permiten describir variables y analizar su comportamiento en un momento específico,

facilitando el diagnóstico de mercados y preferencias de consumo dentro de investigaciones aplicadas.

Para cumplir el primer objetivo específico, se consideraron variables relacionadas con hábitos de consumo y preferencias de los consumidores. Entre los principales indicadores analizados se incluyeron frecuencia de consumo, tipos de snacks preferidos, importancia atribuida al sabor, precio, tamaño y percepción de productos saludables, así como establecimientos habituales de compra. Estas variables son ampliamente utilizadas en estudios de comportamiento del consumidor y análisis de mercados alimentarios (Kotler y Keller, 2016).

Respecto al segundo objetivo específico, se analizaron variables relacionadas con aceptación potencial del producto, preferencias sensoriales, percepción de beneficios saludables y disposición a pagar por snacks derivados de nopal. Los indicadores incluyeron intención de compra, percepción de beneficios nutricionales, preferencia de sabores y rangos de precios aceptables. Estudios sobre aceptación de alimentos funcionales señalan que estos factores influyen directamente en la intención de compra del consumidor (de Albuquerque *et al*., 2022).

En relación con el tercer objetivo específico, se analizaron variables relacionadas con perfil del consumidor, hábitos de compra y oportunidades de posicionamiento comercial. Entre los indicadores considerados se incluyeron características sociodemográficas, nivel de ingresos, percepción de productos saludables y canales de comercialización preferidos. El análisis de estas variables permite identificar segmentos de mercado y oportunidades estratégicas para el diseño de modelos de negocio orientados al consumidor (Malhotra, 2008).

La unidad de análisis estuvo conformada por consumidores potenciales de snacks en Delicias, Chihuahua, considerando personas con hábitos de consumo relacionados con botanas y productos de consumo rápido. Este enfoque permitió evaluar el comportamiento del consumidor y determinar la viabilidad potencial de introducir snacks saludables elaborados a base de nopal en el mercado local. Definir correctamente la unidad de análisis favorece la validez de los resultados en estudios de mercado.

La técnica de recolección de información utilizada fue mediante un cuestionario estructurado integrado por preguntas cerradas, de opción múltiple y escalas tipo Likert. El instrumento se organizó en cuatro secciones: datos sociodemográficos, hábitos de consumo, percepción y aceptación de productos derivados de nopal, y disposición de compra y precio. Las escalas

tipo Likert son ampliamente utilizadas para medir actitudes y niveles de aceptación en investigaciones sociales y de mercado (Matas, 2018).

El tamaño de la muestra fue determinado a partir de un estudio exploratorio aplicado a veinte personas pertenecientes al segmento objetivo. Posteriormente, utilizando la variable cuantitativa ingreso familiar mensual, se aplicó la fórmula (Ecuación 1) propuesta por Malhotra (2008) para poblaciones infinitas:

$$n = \frac{(\sigma^2 z^2_{\alpha 95})}{e^2} \quad (1)$$

Dónde:

n= Tamaño de la muestra

σ^2 = Varianza de la población

z^2= Valor para nivel de confianza deseado (valor de z 1.96 para 95% de confianza)

e^2= Margen de error (% de la media de la población)

Finalmente, la información obtenida fue organizada y analizada mediante herramientas de estadística descriptiva, utilizando frecuencias, porcentajes y medidas de tendencia central para interpretar hábitos de consumo, preferencias del consumidor y aceptación potencial de snacks derivados de nopal. Esto permite resumir y representar datos de manera clara para facilitar su interpretación dentro de investigaciones sociales y de mercado (Levin y Rubin, 2010).

Resultados y discusión

Tamaño de la muestra

Determinada a través de los datos de ingresos obtenidos mediante la aplicación de un cuestionario exploratorio a 20 participantes de ciudad Delicias. Con dicha información se calcularon los estimadores de tendencia central y dispersión: media y varianza. El procesamiento de los datos se complementó utilizando una tolerancia del 7% respecto al promedio y un valor estandarizado de z=1.96. Con una varianza de 188,471,052.60 y un 7% de la media de 1,368.50, se aplicó la formula antes mencionada, quedando de la siguiente manera:

$$n = \frac{(\sigma^2 z^2_{\alpha 95})}{e^2} = \frac{(188{,}471{,}052.60 * 3.84)}{1{,}872{,}792.25} = 387 \quad (2)$$

Como parte de la siguiente fase del estudio y con el objetivo de asegurar la representatividad estadística, el diseño muestral estableció la aplicación de 387 cuestionarios a los consumidores potenciales de snacks en Delicias, Chihuahua. Permitiendo consolidar el trabajo de campo y avanzar al análisis de los datos.

Análisis de resultados

Los resultados obtenidos permitieron identificar características relevantes del mercado objetivo y analizar tendencias de consumo relacionadas con productos saludables derivados de nopal.

En relación con ingreso familiar mensual (cuadro 1), Poco más de la mitad de los participantes, con un 51.6 % reportó ingresos inferiores a $20,000 mensuales. Asimismo, el 20.3 % señaló ingresos superiores a $30,000 pesos, el 14.9% percibió entre $20,000 y $25,000 pesos y el 12.7% entre $25,000 y $30,000 pesos mensuales. La diversidad observada en los niveles de ingreso permite identificar distintos segmentos de mercado potencial para snacks saludables derivados de nopal y facilita el diseño de estrategias de precio y posicionamiento comercial (Malhotra, 2008).

Cuadro 3. Rango de ingreso familiar mensual

	Porcentaje
Menos de $15,000	25.9

De $15,000 a $20,000	26.2
De $20,000 a $25,000	14.9
De $25,000 a $30,000	12.7
Mas de $30,000	20.3
Total	100.0

Fuente: Elaboración propia.

Hábitos de consumo de snacks

Los resultados obtenidos muestran que el consumo de snacks forma parte de los hábitos alimenticios cotidianos de la mayoría de los participantes. Del total de encuestados, el 95.6% indicó consumir snacks de manera habitual, dando a conocer una alta presencia de snacks dentro de la dieta de los consumidores locales, lo cual refleja el potencial del mercado para el desarrollo de nuevas alternativas saludables.

En relación con la frecuencia de consumo (figura 1), el 43.5% de los participantes reportó consumir snacks de dos a tres veces por semana, seguido por un 23.0% que señaló consumirlos una vez por semana. Asimismo, el 18.4% indicó un consumo diario.

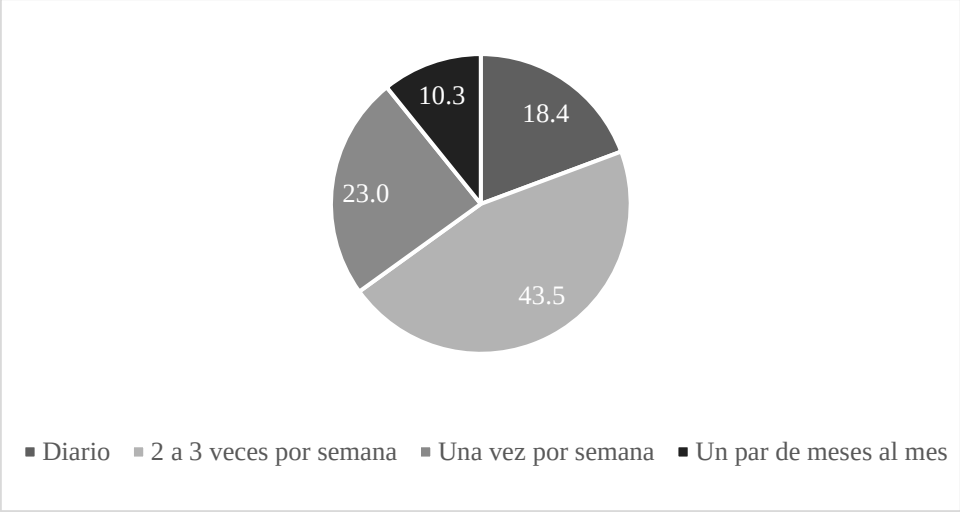


Figura 1. Frecuencia de consumo de snacks

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, los resultados relacionados con las características valoradas al momento de adquirir un snack (cuadro 2) muestran que el sabor representa el atributo de mayor importancia para los consumidores, seguido del tamaño o porción y el precio.

Este comportamiento coincide con estudios sobre comportamiento del consumidor alimentario, los cuales señalan que la aceptación de productos saludables depende de lograr un equilibrio entre atributos sensoriales, valor nutricional y accesibilidad económica (Asioli *et al.*, 2017).

Esto resulta especialmente relevante para el diseño de snacks derivados de nopal, ya que el éxito comercial del producto dependerá no solo de sus beneficios funcionales, sino también de su aceptación sensorial. Lo anterior sugiere que las estrategias de marketing para snacks derivados de nopal deben adaptarse a distintos segmentos de mercado, combinando beneficios funcionales con atributos sensoriales atractivos.

Cuadro 4. Atributos valorados por los consumidores

Variable evaluada	Categoría con mayor preferencia	Porcentaje
Atributo más valorado al comprar snacks	Sabor	81.8 %
Segundo atributo más valorado	Tamaño o porción	41.8 %
Tercer atributo más valorado	Precio	38.4 %
Atributo complementario valorado	Disponibilidad	35.8 %

Fuente: Elaboración propia.

Al relacionar el tipo de producto elegido según los rangos de edades presentados (cuadro 3) se observó que las gomitas de nopal con mango fueron el producto con mayor aceptación en todos los grupos de edad, destacando particularmente el segmento de 26 a 35 años con un

78.4% de preferencia. Asimismo, las papitas de nopal presentaron altos niveles de aceptación entre consumidores jóvenes y adultos,

Por otra parte, las galletas elaboradas con harina de nopal mostraron mayor aceptación en el segmento de mayores de 46 años, posiblemente debido a una mayor valoración de atributos relacionados con salud y nutrición. Investigaciones señalan que los consumidores jóvenes suelen priorizar sabor y practicidad, mientras que los consumidores adultos muestran mayor interés por productos funcionales y saludables (Granato *et al.*, 2020).

Cuadro 5. Relación entre edad de los encuestados y preferencia por productos derivados de nopal

Rango de edad	Gomitas de nopal con mango	Papitas de nopal	Galletas con harina de nopal y chocolate	Paletas de nopal con tamarindo
12 a 15 años	67.9 %	39.6 %	24.5 %	32.1 %
16 a 25 años	77.9 %	67.2 %	36.6 %	49.6 %
26 a 35 años	78.4 %	74.7 %	44.3 %	60.8 %
36 a 45 años	76.1 %	67.4 %	28.3 %	50.0 %
46 años en adelante	76.1 %	70.5 %	55.7 %	62.3 %

Fuente: Elaboración propia.

Disposición de compra y precio

La disposición de compra hacia snacks derivados de nopal (figura 2) mostró resultados favorables, ya que una proporción considerable de los participantes manifestó interés en adquirir este tipo de productos.

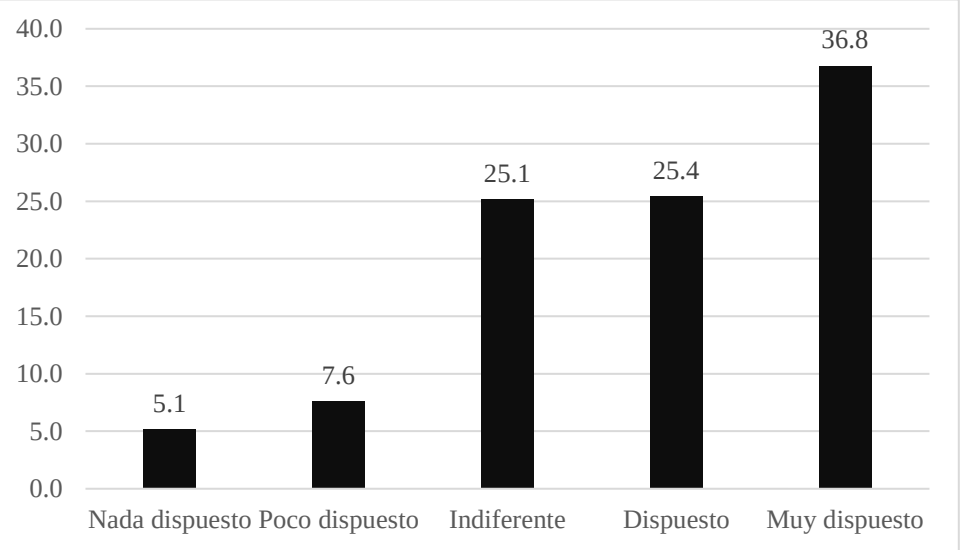


Figura 2. Disposición de compra de snacks de nopal

Fuente: Elaboración propia.

En relación con el precio, la mayor parte de los encuestados manifestó disposición a pagar rangos accesibles y competitivos, principalmente entre $15 y $25 pesos por unidad.

Asimismo, los consumidores indicaron mayor disposición de compra cuando los productos combinaban beneficios saludables con sabores atractivos y presentaciones prácticas. Por lo tanto, el diseño de productos derivados de nopal debe considerar tanto la calidad nutricional como las expectativas sensoriales del consumidor objetivo.

Existe potencial comercial para snacks derivados de nopal dentro del mercado local, siempre que los productos mantengan precios competitivos y estrategias de comunicación enfocadas en beneficios saludables, sabor y naturalidad. Esto representa una oportunidad para el desarrollo de una start-up orientada a consumidores interesados en alternativas alimenticias innovadoras y funcionales.

Las tiendas de la esquina representan el principal canal de comercialización para este tipo de snacks (cuadro 4), especialmente entre jóvenes de 16 a 25 años y adultos jóvenes de 26 a 35 años, segmentos que suelen priorizar la accesibilidad, cercanía y disponibilidad inmediata del producto. Asimismo, las tiendas de autoservicio mostraron una mayor preferencia en consumidores de 36 a 45 años y de 46 años en adelante, quienes tienden a realizar compras

más planificadas y buscar una mayor variedad de productos. Por otra parte, las cafeterías y tiendas escolares presentaron relevancia principalmente entre adolescentes de 12 a 15 años, debido a la practicidad y facilidad de acceso durante sus actividades diarias.

Cuadro 6. Canales de comercialización para snacks derivados de nopal

Variable evaluada	Categoría predominante	Porcentaje	Población objetivo con mayor preferencia
Canal de compra preferido	Tienda de la esquina	69.0 %	Jóvenes de 16 a 25 años y adultos jóvenes de 26 a 35 años
Segundo canal de compra	Tiendas de autoservicio	50.0 %	Adultos de 36 a 45 años
Canal de compra en consumidores jóvenes	Cafeterías/tiendas escolares	17.0 %	Adolescentes de 12 a 15 años
Canal alternativo de compra	Vendedores ambulantes	10.7 %	Adultos mayores de 46 años
Otros puntos de compra	Otros establecimientos	2.7 %	Adultos jóvenes de 26 a 35 años

Fuente: Elaboración propia.

Los consumidores jóvenes de 16 a 25 años presentan la mayor frecuencia de compra de snacks (cuadro 5), predominando el consumo de dos a tres veces por semana. Este segmento también manifestó mayor aceptación hacia precios accesibles entre $20 y $25 pesos, lo cual refleja sensibilidad al precio y preferencia por productos prácticos y de consumo frecuente.

Los adultos jóvenes de 26 a 35 años exhibieron un comportamiento de consumo similar, con una frecuencia de dos a tres veces por semana, presentando así mismo la mayor preferencia por el rango de $20 a $25 pesos con un 33.6 %, lo que indica una mayor disposición a invertir en snacks diferenciado. Los consumidores mayores de 46 años presentaron menor frecuencia de compra, aunque mostraron mayor tolerancia a rangos de precio superiores. De esta forma, los snacks derivados de nopal poseen potencial para adaptarse a diferentes segmentos de mercado mediante estrategias diferenciadas de precio y posicionamiento.

Cuadro 7. Frecuencia de compra y rango de precio por segmento de mercado

Segmento de mercado	Frecuencia de compra predominante	Porcentaje	Rango de precio con mayor aceptación	Porcentaje
Adolescentes de 12 a 15 años	Diario	28.3%	$10 a $15 pesos	40.8%
Jóvenes de 16 a 25 años	2 a 3 veces por semana	50.8 %	$20 a $25 pesos	42.5%
Adultos jóvenes de 26 a 35 años	2 a 3 veces por semana	46.7 %	$20 a $25 pesos	33.6%
Adultos de 36 a 45 años	2 a 3 veces por semana	52.4 %	$15 a $20 pesos	34.8%
Adultos mayores de 46 años	1 vez por semana	33.9%	$20 a $25 pesos	26.4%

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Los resultados obtenidos permitieron identificar que el consumo de snacks forma parte de los hábitos alimenticios frecuentes de la población encuestada, particularmente entre jóvenes y adultos jóvenes. Se observó que los consumidores priorizan atributos como sabor, precio y tamaño de la presentación al momento de elegir este tipo de productos, además de mostrar preferencia por adquirirlos en tiendas de la esquina y tiendas de conveniencia.

Respecto a la evaluación de aceptación y disposición de compra, los productos derivados de nopal presentaron una respuesta favorable por parte de los consumidores, destacando principalmente las gomitas y papitas de nopal como las alternativas con mayor potencial comercial. Asimismo, los participantes manifestaron disposición a adquirir productos innovadores elaborados con ingredientes naturales y asociados con beneficios para la salud. El producto debe posicionarse en un rango de precio psicológico similar al de las marcas líderes. Los rangos de precio más aceptados se concentraron entre $20 y $25 pesos, lo cual

permite establecer parámetros comerciales viables para el desarrollo de estrategias de mercado orientadas al consumidor objetivo. El empaque debe utilizar códigos visuales propios de la comida chatarra, con colores vibrantes, tipografías dinámicas, imágenes apetitosas para competir visualmente en el mismo anaquel que las botanas tradicionales, comunicando que es un producto delicioso.

La percepción positiva hacia productos saludables, la tendencia creciente hacia el consumo de alimentos funcionales y la aceptación observada en distintos segmentos de mercado demuestran que existe viabilidad mercadológica para el proyecto. Además, el aprovechamiento del nopal como materia prima regional representa una oportunidad de diferenciación comercial y generación de valor agregado, fortaleciendo el potencial competitivo y económico de la propuesta dentro del mercado local de snacks saludables.

Literatura citada

Libros

Bernal, C. (2016). *Metodología de la investigación* (4ta ed.). Pearson Educación.

Blank, S., & Dorf, B. (2020). *The Startup Owner's Manual: The Step-By-Step Guide for Building a Great Company.* Wiley.

Hernández-Samperi, R., & Mendoza-Torres, C. P. (2018). *Métodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta.* McGraw-Hill. doi:10.22201/fesc.20072236e.2019.10.18.6

Kotler, P., & Keller, K. (2016). *Dirección de Marketing.* México: Pearson Educación.

Levin, R., & Rubin, D. (2010). *Estadística para administración y economía* (7ma ed.). Pearson Educación.

Malhotra, N. K. (2008). *Investigación de Mercados.* Pearson Educación.

Revistas

Aparicio, G., & Olvera, F. (2023). Metodología para la integración de modelo de negocio en Mypes. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 364-377. doi:https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.8693

Asioli, D., Aschemann-Witzel, J., Caputo, V., Vecchio, R., Annunziata, A., Næs, T., & Varela, P. (2017). Making sense of the "clean label" trends: A review of consumer food choice behavior and discussion of industry implications. *Food Research International*, 58-71. doi:10.1016/j.foodres.2017.07.022

Cammarelle, A., Viscecchia, R., De Devitiis, B., Panniello, U., & Gorgoglione, M. (2025). Consumers' behavior toward healthy foods: A critical review. *Food Reviews International*, 611-640. doi:10.1080/87559129.2024.2432927

Crofton, E., Markey, A., & Scannell, A. (2013). Consumers' expectations and needs towards healthy cereal based snacks: An exploratory study among Irish adults. *British Food Journal*, 1130-1148. doi:10.1108/BFJ-08-2011-0213

de Albuquerque, J., de Souza Aquino, J., de Albuquerque, J., de Farias, T., Escalona-Buendía, H., Bosquez-Molina, E., & Azoubel, P. (2019). Consumer perception and use of nopal (Opuntia ficus-indica): A cross-cultural study between Mexico and Brazil. *Food Research International*, 101-108. doi:10.1016/j.foodres.2018.08.036

de Albuquerque, J., Escalona-Buendía, H., de Souza Aquino, J., & da Silva Vasco, M. (2022). Nopal beverage (Opuntia ficus-indica) as a non-traditional food: Sensory properties, expectations, experiences, and emotions of low-income and food-insecure Brazilian potential consumers. *Food Research International*. doi:10.1016/j.foodres.2021.110910

El Bilali, H., & Allahyari , M. (2018). Transition towards sustainability in agriculture and food systems: Role of information and communication technologies. *Information Processing in Agriculture, 5*(4), 456-464. doi:10.1016/j.inpa.2018.06.006

El-Mostafa, K., El Kharrassi, Y., Badreddine, A., Andreoletti, P., & Vamecq, J. (2014). Nopal Cactus (Opuntia ficus-indica) as a Source of Bioactive Compounds for Nutrition, Health and Disease. 14879-14901. doi:10.3390/molecules190914879

Granato, D., Barba, F., Bursać Kovačević, D., Lorenzo, J., Cruz, A., & Putnik, P. (2020). Functional Foods: Product Development, Technological Trends, Efficacy Testing, and Safety. *Annual Review Of Food Sience and Technology*, 93-118. doi:10.1146/annurev-food-032519-051708

Matas, A. (2018). Diseño del formato de escalas tipo Likert: Un estado de la cuestión. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 38-47. doi:10.24320/redie.2018.20.1.1347

Van Kleef, E., Kai, & Van Trijp, H. C. (2012). Healthy snacks at the checkout counter: A lab and field study on the impact of shelf arrangement and assortment structure on consumer choices. *BMC Public Health*. doi:10.1186/1471-2458-12-1072

Referencia electrónica

Sáenz, C. (2007). *Utilización agroindustrial del nopal.* Roma: Food & Agriculture Org. Obtenido de: https://www.fao.org/4/a0534s/a0534s00.pdf

SIAP. (2024). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera: Panorama agroalimentario de Chihuahua*. Obtenido de Gobierno de México: https://www.gob.mx/siap

Wein, H. (2024). *Dejunking Your Diet. The Drawbacks of Ultra-Processed Foods.* Obtenido de News and Health: https://newsinhealth.nih.gov/2024/02/dejunking-your-diet

Geointeligencia como disciplina estratégica para la Innovación Educativa en la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo

Paul Reyes Ayala[85]

Resumen

La Geointeligencia, entendida como la integración de datos geoespaciales mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), teledetección y modelado predictivo, ha transitado de sus orígenes militares para convertirse en una herramienta estratégica de gestión sustentable de recursos e innovación educativa. Este trabajo analiza su implementación en la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, destacando aplicaciones interdisciplinarias en agricultura, ganadería y silvicultura. Al incorporar la Geointeligencia al currículo, los estudiantes fortalecen competencias científicas y tecnológicas, desarrollan conciencia ambiental y adquieren habilidades para enfrentar retos como el cambio climático, la seguridad alimentaria y la sustentabilidad territorial. La integración de inteligencia artificial, plataformas digitales y tecnologías geoespaciales transforma las aulas en laboratorios vivos de innovación, vinculando teoría y práctica en concordancia con los principios de la Nueva Escuela Mexicana. La Geointeligencia se erige así no solo como un avance técnico, sino como una revolución pedagógica que forma líderes del desarrollo agropecuario sustentable.

Palabras clave: Geointeligencia, SIG, teledetección, educación agrícola, Chapingo, sustentabilidad, inteligencia artificial.

Abstract

Geointelligence, understood as the integration of geospatial data through Geographic Information Systems (GIS), remote sensing, and predictive modeling, has transitioned from military origins to become a strategic tool for sustainable resource management and educational innovation. This study explores its implementation at the Agricultural Preparatory School of the Universidad Autónoma Chapingo, highlighting interdisciplinary applications in agriculture, livestock, and forestry. By embedding geointelligence into the curriculum, students strengthen scientific and technological competencies, develop environmental awareness, and acquire skills to address pressing challenges such as climate change, food security, and territorial sustainability. The integration of artificial intelligence,

[85] Profesor Investigador del Área de Agronomía. Preparatoria Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Correo: preyesa@chapingo.mx

digital platforms, and geospatial technologies transforms classrooms into living laboratories of innovation, linking theory with practice and aligning with the principles of the New Mexican School. Ultimately, geointelligence emerges not only as a technical advancement but also as a pedagogical revolution that empowers students to become leaders in sustainable agricultural development and strategic territorial management.

Keywords: Geointelligence, GIS, Remote Sensing, Agricultural Education, Chapingo, Sustainability, Innovation, Artificial Intelligence.

Introducción

La Universidad Autónoma Chapingo se ha consolidado como institución pionera en la formación agropecuaria de México, con una trayectoria que la posiciona como referente nacional en innovación educativa y sustentabilidad. En un escenario global marcado por el cambio climático, la degradación ambiental y la creciente demanda de producir alimentos de manera sostenible, surge la Geointeligencia como disciplina estratégica capaz de integrar cartografía digital, Sistemas de Información Geográfica (SIG), sensores remotos y análisis de datos avanzados para la toma de decisiones fundamentadas. Su incorporación en la Preparatoria Agrícola no solo fortalece la formación científica y tecnológica de los estudiantes, sino que también vincula teoría y práctica en los ámbitos agrícola, pecuario y forestal. De esta manera, la Geointeligencia se convierte en un eje transversal que impulsa competencias digitales, conciencia ambiental y pensamiento crítico, preparando a los jóvenes para enfrentar los retos del siglo XXI.

Concepto y ciencias asociadas a la Geointeligencia

La Geointeligencia es un campo interdisciplinario que combina el análisis de datos geoespaciales con tecnologías digitales para generar conocimiento estratégico sobre el territorio y sus recursos. Su fuerza radica en la integración de diversas ciencias y técnicas que permiten observar, medir y modelar fenómenos naturales y sociales. Entre las ciencias asociadas destacan la Geomática, que organiza y procesa la información espacial en mapas digitales; la Teledetección, que capta imágenes multiespectrales desde satélites y drones para monitorear cultivos, bosques o ciudades; y la Percepción Remota, que posibilita la observación de fenómenos ambientales sin contacto directo. Asimismo, la Topografía aporta datos sobre relieve, pendientes y drenajes, mientras que la Fotogrametría reconstruye modelos tridimensionales del terreno a partir de fotografías aéreas. La Geodesia asegura la precisión en la georreferenciación, la cartografía permite la elaboración de mapas y su representación cartográfica, y disciplinas como la estadística y las ciencias de la computación

permiten analizar patrones espaciotemporales y procesar grandes volúmenes de información mediante inteligencia artificial y big data (Figura 1).

Big data: conjuntos de datos tan grandes, rápidos y complejos que es imposible procesarlos o analizarlos con métodos tradicionales o software común

En su conjunto, estas ciencias convierten a la Geointeligencia en una herramienta estratégica de gran alcance, capaz de transformar la agricultura de precisión, la gestión forestal, la planificación urbana y la seguridad ambiental. Más que un recurso técnico, se erige como un eje fundamental para la toma de decisiones sustentables y visionarias, orientadas a enfrentar los desafíos del cambio climático y la seguridad alimentaria. De ahí surge la trascendencia de llevar esta tecnología al ámbito educativo: incorporar la Geointeligencia en las aulas no solo fortalece la formación científica y tecnológica de los estudiantes, sino que también los prepara para convertirse en agentes de cambio, capaces de aplicar el conocimiento en beneficio de la sociedad y del territorio.



Figura 1. Ciencias asociadas a la geointeligencia y su aplicación en el medio agropecuario.

Materiales y métodos

Para el desarrollo de este trabajo se realizó un análisis documental y conceptual sobre la Geointeligencia, sus ciencias asociadas y las herramientas digitales y de inteligencia artificial disponibles para su aplicación en el sector agropecuario (véase la sección de Resultados). A partir de este marco teórico se diseñó una propuesta de incorporación curricular de la Geointeligencia en el plan de estudios de la Preparatoria Agrícola de Chapingo, planteada como un eje transversal que articula las ciencias agronómicas con las ciencias exactas y experimentales, y estructurada en tres fases progresivas.

En la fase introductoria, asignaturas como Agronomía I y II y Cómputo pueden integrar nociones básicas de geomática y sistemas de información geográfica (SIG), permitiendo que los estudiantes se familiaricen con el manejo de datos espaciales y el uso de software libre como QGIS, sentando las bases para comprender cómo la información geoespacial se relaciona con la producción agrícola y el análisis de suelos.

En la fase de profundización, materias como Agronomía III y IV, junto con Biología y Física, pueden incorporar prácticas de teledetección y percepción remota para el monitoreo de cultivos y ecosistemas, vinculando los contenidos experimentales con la aplicación de sensores y drones y la generación de índices como el NDVI y mapas de humedad del suelo. De esta manera, los estudiantes aprenden a correlacionar variables ambientales con procesos productivos, desarrollando competencias científicas y digitales que fortalecen su formación agronómica.

Finalmente, en la fase de acentuación, asignaturas como Genética, Meteorología, Sistemas de Producción Forestal y Animal, y especialmente Fundamentos de Geomática, pueden consolidar la enseñanza de fotogrametría, geodesia y modelado predictivo con inteligencia artificial. Esto se traduce en proyectos integradores donde los estudiantes aplican la geointeligencia para resolver problemas reales de la comunidad agrícola, alineando la innovación tecnológica con los principios de la Nueva Escuela Mexicana, que promueve la interdisciplinariedad, la sustentabilidad y el aprendizaje situado. Con infraestructura adecuada y profesores capacitados en procesos de reestructuración académica, la geointeligencia puede convertirse en un componente estratégico para formar jóvenes preparados ante los retos de la producción agropecuaria sustentable.

Resultados y discusión

Utilidad de la Geointeligencia en el medio agropecuario

La Geointeligencia constituye un campo interdisciplinario de alta relevancia para el sector agropecuario, ya que integra procedimientos de captura, procesamiento y análisis de información espacial, ambiental y productiva con el propósito de optimizar la gestión de los recursos naturales y fortalecer la toma de decisiones estratégicas. En el ámbito agrícola, se operacionaliza mediante agricultura de precisión, que emplea drones equipados con sensores multiespectrales, sistemas de información geográfica (SIG) y modelos de teledetección para generar índices como el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), mapas de humedad del suelo y curvas de nivel con modelos digitales de elevación; estos insumos permiten aplicar riego y fertilización de manera localizada, reduciendo costos y maximizando la productividad.

NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada): indicador numérico utilizado para evaluar la salud y la densidad de la vegetación a partir de imágenes satelitales o tomadas por drones

En el sector pecuario, la geointeligencia se aplica a la gestión de pastizales y a la selección genética adaptada al territorio, integrando mapas de distribución animal con variables climáticas y topográficas, lo que posibilita identificar razas con mayor resistencia al calor, la humedad o la altitud; adicionalmente, la percepción remota y la fotogrametría apoyan el diseño de instalaciones pecuarias considerando pendientes y drenajes. En el ámbito forestal, se emplean imágenes satelitales multiespectrales y modelos predictivos para el monitoreo de la deforestación y la regeneración natural, la detección temprana de incendios y la evaluación de biodiversidad, generando representaciones tridimensionales del terreno mediante fotogrametría y asegurando precisión georreferencial con geodesia.

En conjunto, estas aplicaciones integran disciplinas como la geomática, teledetección, percepción remota, topografía y fotogrametría, transformando grandes volúmenes de datos geoespaciales en conocimiento científico aplicable, lo que impulsa una producción agropecuaria más eficiente, sostenible y resiliente frente al cambio climático, además de contribuir a la seguridad alimentaria y a la conservación de los ecosistemas (Figura 2).



Figura 2. Proceso científico estructurado del uso de la Geointeligencia en el sector agropecuario.

Inteligencia Artificial y herramientas digitales de trabajo

La inteligencia artificial (IA) desempeña un papel esencial dentro de la geointeligencia agropecuaria, al proporcionar capacidades avanzadas de análisis, modelado y automatización que superan los límites del procesamiento humano. Su intervención se centra en la gestión de grandes volúmenes de datos geoespaciales provenientes de sensores, drones, estaciones meteorológicas y satélites. Mediante algoritmos de machine learning y deep learning, la IA identifica patrones complejos en imágenes multiespectrales y térmicas, permitiendo detectar plagas, estrés hídrico, deforestación o variaciones en la cobertura vegetal con una precisión milimétrica.

Machine Learning (Aprendizaje Automático): rama de la inteligencia artificial que permite a las computadoras aprender y tomar decisiones a partir de datos, sin ser programadas explícitamente para cada tarea. Deep Learning (Aprendizaje Profundo): subcategoría del Machine Learning que utiliza redes neuronales artificiales profundas para imitar la forma en que los humanos procesan la información y aprenden.

Además, los modelos predictivos basados en redes neuronales y análisis estadístico multivariante facilitan la estimación de rendimientos agrícolas, la disponibilidad hídrica y los riesgos climáticos, integrando variables espaciales y temporales para generar escenarios de simulación. Esta capacidad de correlación y predicción convierte a la IA en el núcleo analítico de la geointeligencia, capaz de transformar datos dispersos en conocimiento científico aplicable.

En cuanto a las herramientas más recomendables, destacan aquellas que combinan potencia computacional con accesibilidad técnica. En el análisis de imágenes y datos geoespaciales, plataformas como Google Earth Engine, ArcGIS Pro y QGIS (con complementos de IA) permiten procesar información satelital y generar mapas temáticos automatizados. Para el modelado predictivo y la minería de datos, Microsoft Azure AI, IBM Watson Studio, RapidMiner y Orange Data Mining ofrecen entornos robustos para construir modelos de aprendizaje supervisado y no supervisado. En la automatización de procesos agropecuarios, herramientas como DroneDeploy, Agremo, FarmBot y John Deere Operations Center integran IA con sensores IoT, permitiendo ajustar riego, fertilización y manejo pecuario en tiempo real.

En conjunto, estas tecnologías consolidan un ecosistema inteligente que impulsa una producción agropecuaria más eficiente, sostenible y resiliente frente al cambio climático, fortaleciendo la seguridad alimentaria y la gestión territorial basada en evidencia científica. Su integración en el plan de estudios de la Preparatoria Agrícola no solo moderniza la enseñanza, sino que también conecta a los estudiantes con la investigación aplicada y la innovación tecnológica, alineándose con los principios de la Nueva Escuela Mexicana (Figura 3).



Figura 3. Herramientas digitales y de inteligencia artificial aplicadas a la geointeligencia agropecuaria.

La implementación de la geointeligencia como herramienta estratégica para la innovación educativa en el plan de estudios de la Preparatoria Agrícola de Chapingo abre un horizonte transformador. En el ámbito agrícola, el uso de imágenes satelitales para la planificación de riego y la detección temprana de plagas permite que los estudiantes comprendan cómo la tecnología se convierte en un aliado directo de la producción sustentable. En el sector pecuario, la integración de mapas genéticos vinculados a datos topográficos y climáticos fortalece la selección reproductiva y la adaptación de razas, mostrando a los jóvenes cómo la ciencia aplicada puede mejorar la eficiencia y resiliencia de los sistemas productivos.

En el área forestal, el monitoreo satelital de la deforestación y la regeneración natural se convierte en un ejercicio práctico de conciencia ambiental y gestión territorial, mientras que, en el ámbito educativo, la geointeligencia fomenta competencias digitales, pensamiento crítico y aprendizaje interdisciplinario. Esta articulación con las ciencias agronómicas y las líneas curriculares existentes permite que los estudiantes no solo dominen herramientas técnicas, sino que también participen en proyectos de investigación universitaria y extensión rural, vinculando su formación con las necesidades reales del campo mexicano.

La geointeligencia no es únicamente un recurso tecnológico, sino un motor de innovación pedagógica alineado con la Nueva Escuela Mexicana, que promueve la sustentabilidad, la equidad y el aprendizaje situado. Su incorporación en el currículo convierte a los estudiantes en protagonistas de la transformación agropecuaria, capaces de aplicar el conocimiento científico para fortalecer la seguridad alimentaria y la gestión territorial sustentable. Formar jóvenes que no solo aprendan a usar la tecnología, sino que la conviertan en una herramienta de cambio social y ambiental, consolida a la Preparatoria Agrícola como referente institucional en formación agronómica de vanguardia.

Conclusiones

La Geointeligencia como herramienta estratégica para la innovación educativa en la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo representa un salto cualitativo hacia una formación científica, tecnológica y humanista que responde a los desafíos del siglo XXI. Su incorporación en el plan de estudios no solo fortalece las ciencias agronómicas, sino que también impulsa una nueva manera de aprender y enseñar, donde los datos geoespaciales, la inteligencia artificial y la sustentabilidad convergen para formar estudiantes capaces de analizar, interpretar y transformar su entorno. Esta integración convierte el aula en un laboratorio vivo de innovación, donde la teoría se vincula con la práctica y la tecnología se convierte en un medio para comprender y cuidar el territorio.

Los resultados de esta implementación evidencian que la geointeligencia potencia la capacidad de los jóvenes para aplicar el conocimiento científico en la planificación agrícola, la gestión pecuaria y el monitoreo forestal, al tiempo que desarrolla competencias digitales y conciencia ambiental. En el marco de la Nueva Escuela Mexicana, esta propuesta promueve el aprendizaje situado, la interdisciplinariedad y la vinculación comunitaria, permitiendo que los estudiantes participen activamente en proyectos de investigación y extensión rural. Así, la educación agrícola se transforma en un espacio de creación y compromiso social, donde la tecnología se pone al servicio del bienestar colectivo y la sustentabilidad del campo mexicano.

La geointeligencia no es solo una innovación técnica, sino una revolución pedagógica que inspira a los estudiantes a convertirse en líderes del cambio agropecuario. Su implementación en Chapingo reafirma la misión de formar jóvenes con pensamiento crítico, sensibilidad ambiental y visión científica, capaces de integrar tradición y modernidad para construir un futuro más justo y sostenible. Este enfoque invita a mirar el conocimiento no como un fin, sino como una herramienta para transformar la realidad, sembrando en cada estudiante la

convicción de que la educación y la tecnología pueden —y deben— ser el motor de un campo mexicano más inteligente, productivo y humano.

Literatura citada

Díaz Barriga, F. (2006). Enseñanza situada: Vínculo entre la escuela y la vida. McGraw-Hill Interamericana.

Flores Portillo, M. L., Machin-Mastromatteo, J. D., & Tarango, J. (2026). Propuesta metodológica para analizar la aceptación, uso e integración de la inteligencia artificial generativa en instituciones de educación superior. AULA Revista de Humanidades y Ciencias Sociales, 72(1), 19–35. https://revistas.unphu.edu.do/index.php/aula/article/view/450/1071

Jensen, J. R. (2015). Introductory digital image processing: A remote sensing perspective (4th ed.). Pearson.

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). Geographic information systems and science (4th ed.). Wiley.

Maza Dueñas, M., & García González, V. (2024). Universidad Autónoma Chapingo: modelo educativo y planes de estudio 2023–2025. TLATEMOANI. Revista Académica de Investigación, 15(46), 1–22. https://doi.org/10.51896/tlatemoani.v15i46.637

Universidad Autónoma Chapingo. (2025). Modelo educativo de la Universidad Autónoma Chapingo. Universidad Autónoma Chapingo. https://sppe.chapingo.mx/24943-2/

Sistema de información climática local y proyecciones de cambio climático para el estado de Sinaloa (SICCLOS)

Gabriela Ramírez Ojeda[86], Alejandro García González[87], José Germán Flores Garnica

Resumen

El Sistema de Información Cimática Local y Proyecciones de Cambio Climático para el estado de Sinaloa (SICCLOS), es una herramienta desarrollada para facilitar la consulta, visualización y análisis de información climática histórica y de proyecciones de cambio climático, a nivel de localidades rurales y urbanas. Dicho sistema integra información climática proveniente de WorldClim, utilizando la metodología de referencia y el modelo EC-Earth3-Veg, del proyecto CMIP6, bajo los escenarios socioeconómicos compartidos SSP245, SSP370 y SSP585, para los horizontes temporales 2041–2060 (2050) y 2061–2080 (2070), con resolución espacial de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km²). La información fue procesada mediante Sistemas de Información Geográfica, posteriormente fue organizada en una plataforma interactiva cuyo formato de entrega es una interface interactiva, la cual permite realizar consultas para localidades específicas del estado de Sinaloa, referentes a valores mensuales de temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación. Además, genera automáticamente los climogramas y tablas descriptivas, que facilitan la consulta información y la comparación entre las condiciones climáticas actuales y las proyecciones futuras. De esta forma, SICCLOS, constituye una tecnología de apoyo para investigadores, instituciones gubernamentales, productores y tomadores de decisiones, ya que facilita la consulta de información climática, sin necesidad de que tengan conocimiento técnico especializado en el uso de herramientas geoespaciales. La información generada puede ser usada para diferentes estudios, como planeación territorial, gestión de recursos naturales, adaptación al cambio climático y diseño de estrategias de conservación. Asimismo, su metodología es replicable y puede ampliarse para incorporar nuevas variables climáticas y otras regiones del país.

Palabras clave: Normales climáticas, Escenarios socioeconómicos, Localidades rurales y urbanas.

[86] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. CIRPAC, CE Centro Altos de Jalisco. Av. Biodiversidad 2470. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, 47714, MÉXICO. ramirez.gabriela@inifap.gob.mx*, flores.german@inifap.gob.mx
[87] Universidad de Occidente. Blvd. Macario Gaxiola y Carretera Internacional México 15. 81223, MÉXICO 05alejandrogago@gmail.com

Abstract

The Local Climate Information and Climate Change Projections System for the State of Sinaloa (SICCLOS) is a tool developed to facilitate the retrieval, visualization, and analysis of historical climate data and climate change projections at the rural and urban locality levels. This system integrates climate data from WorldClim, using the reference methodology and the EC-Earth3-Veg model from the CMIP6 project, under the shared socioeconomic scenarios SSP245, SSP370, and SSP585, for the time horizons 2041–2060 (2050) and 2061–2080 (2070), with a spatial resolution of 30 arcseconds (approximately 1 km²). The data was processed using Geographic Information Systems (GIS) and subsequently organized into an interactive platform presented as an interactive interface, which allows users to query specific locations in the state of Sinaloa for monthly values of average temperature, maximum temperature, minimum temperature, and precipitation. In addition, it automatically generates climatograms and descriptive tables, which facilitate information retrieval and comparisons between current climate conditions and future projections. As such, SICCLOS serves as a support tool for researchers, government agencies, producers, and decision-makers, as it makes it easier to access climate information without requiring specialized technical knowledge in the use of geospatial tools. The information generated can be used for various studies, such as land-use planning, natural resource management, climate change adaptation, and the design of conservation strategies. Furthermore, its methodology is replicable and can be expanded to incorporate new climate variables and other regions of the country.

Keywords: Climate norms, socioeconomic scenarios, Rural and urban localities.

Introducción

El estado de Sinaloa, ubicado en la costa oeste de México, presenta una alta exposición a eventos hidrometeorológicos extremos. En años recientes, la región ha experimentado fenómenos como sequías prolongadas, inundaciones y el impacto de tormentas tropicales de alta intensidad, los cuales han incrementado la vulnerabilidad ambiental y socioeconómica del estado (Comisión para la Investigación y Defensa de las Hortalizas de Sinaloa, 2023).

Uno de los principales desafíos es la recurrencia de sequías que han afectado gravemente la producción agrícola, actividad económica fundamental para la entidad. La disminución en los volúmenes de precipitación ha generado pérdidas significativas de cultivos y una reducción en la productividad agrícola. Paralelamente, se ha documentado un aumento en la frecuencia e intensidad de tormentas tropicales y huracanes que impactan la costa sinaloense (Comisión para la Investigación y Defensa de las Hortalizas de Sinaloa, 2023).

Ante estas condiciones de bastante variabilidad, es fundamental contar con información climática actualizada, convirtiéndose en una necesidad apremiante. Tradicionalmente, la planeación territorial y la gestión de recursos naturales se han apoyado en registros históricos; sin embargo, el ritmo acelerado de las alteraciones climáticas exige complementar esta visión con un enfoque prospectivo. El Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2023) subraya que el cambio climático de origen antrópico ya está alterando los patrones meteorológicos, impactando directamente la seguridad alimentaria y los recursos hídricos. Por lo tanto, para el diseño de estrategias de adaptación efectivas, resulta indispensable contar con datos recientes y proyecciones confiables que anticipen las condiciones futuras que se podrían prevalecer en cierta región.

Aunque existen trabajos valiosos para sistematizar la climatología de la entidad, como la publicación sobre Estadísticas climatológicas básicas del estado de Sinaloa (Periodo 1961–2003) elaborada por el INIFAP (Ruiz C. et al., 2005), este tipo de acervos representa una fotografía del pasado, al no representar el periodo climático actual vigente. Asimismo, al no integrar las proyecciones de cambio climático, su utilidad práctica para enfrentar los retos actuales se ve limitada, lo que subraya la necesidad de actualizar y modernizar las fuentes y formas de consulta de esta información.

Para cubrir esta necesidad y transitar hacia la planeación anticipada, es necesario recurrir a herramientas de modelación avanzada, como las provenientes del Sexto Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6). Esta iniciativa internacional integra la nueva generación de modelos climáticos globales, diseñados para evaluar con mayor precisión la respuesta del clima bajo el marco de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) (Hausfather, 2019). Específicamente, para analizar el futuro climático se emplean escenarios como el SSP245 (mitigación moderada), SSP370 (altas emisiones regionales) y SSP585 (desarrollo intensivo en combustibles fósiles) (NASA, 2026).

A pesar del avance que representan estos Modelos de Circulación General (GCM), su resolución espacial es relativamente gruesa, lo que limita su capacidad para representar la variabilidad climática a escalas locales (Pickler & Mölg, 2021). Esta barrera es particularmente crítica en Sinaloa, un estado cuya compleja orografía —desde la planicie costera hasta la Sierra Madre Occidental— genera patrones altamente heterogéneos y microclimas muy diversos (Gobierno del Estado de Sinaloa et al., 2016).

Adicionalmente, Brasseur y Gallardo (2016) señalan que el reto de los servicios climáticos no es únicamente generar información de calidad, sino lograr que ésta sea realmente utilizada

por los tomadores de decisiones. Si bien existen plataformas o servicios con datos actualizados como el Sistema Meteorológico Nacional, CONAGUA, INEGI, CONABIO, WorldClim, entre otros (CONAGUA-SMN, 2026; CONABIO, 2026; INEGI, 2025; WorldClim, 2026), su consulta requiere múltiples descargas, procesamiento espacial especializado y conocimientos de geomática y SIG, lo que incrementa el esfuerzo y limita su aprovechamiento práctico para cualquier usuario sin conocimiento especializado (Howard et al., 2020).

Bajo este contexto, se desarrolló el Sistema de Información Climática Local y Proyecciones de Cambio Climático para el Estado de Sinaloa (SICCLOS), concebido como una herramienta en Microsoft Excel que integra información climática histórica y proyecciones de cambio climático de alta resolución mediante una interfaz de consulta automatizada con la opción de elegir la información por localidad. La plataforma incorpora tablas informativas, climogramas y tablas con anomalías climáticas (escenario de referencia vs escenario de cambio climático) que facilitan la visualización e interpretación de la información, eliminando la necesidad de utilizar software especializado para realizar consultas básicas y favoreciendo su aplicación directa en procesos de planificación territorial, gestión de recursos naturales, agricultura y adaptación al cambio climático.

El presente trabajo tiene como objetivo describir el desarrollo general y las principales funcionalidades, usos y ventajas de SICCLOS como una herramienta de apoyo para la consulta y análisis de información climática local y de proyecciones de cambio climático para dos periodos futuros (2050 y 2070) y con tres escenarios (SSP245, SSP370 y SSP585) para el listado de localidades del estado de Sinaloa (INEGI, 2025).

Materiales y métodos

La primera etapa para el desarrollo del Sistema de Información Climática Local y Proyecciones de Cambio Climático para el Estado de Sinaloa (SICCLOS) consistió en la descarga de la información climática desde la base de datos WorldClim versión 2.1, con una resolución espacial de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km²) (Fick & Hijmans, 2017; WorldClim, 2026). Como escenario de referencia se utilizaron las variables climáticas históricas correspondientes al periodo 1970–2000, así como las proyecciones futuras derivadas del modelo climático EC-Earth3-Veg, perteneciente a los Modelos de Circulación General (GCM) del Sexto Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6) (Eyring et al., 2016).

Las proyecciones climáticas consideradas abarcan los horizontes temporales 2041–2060 (2050) y 2061–2080 (2070), bajo los escenarios de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) SSP245, SSP370 y SSP585, los cuales representan diferentes trayectorias de desarrollo socioeconómico y emisiones de gases de efecto invernadero. Para el presente estudio se seleccionó el modelo EC-Earth3-Veg debido a su disponibilidad y a su utilización en investigaciones recientes, por presentar un buen ajuste a las condiciones climatológicas de México (Estrada-Contreras et al., 2024). Debido a que el objetivo del trabajo consistió en desarrollar una herramienta de consulta y no en evaluar el desempeño de múltiples modelos climáticos, se empleó un único GCM, buscando con la información generada identificar tendencias de las condiciones climáticas a futuro bajo diferentes trayectorias de desarrollo socioeconómico.

Una vez descargada la información, el procesamiento geoespacial se llevó a cabo mediante el software QGIS. El primer paso consistió en cortar (extraer por máscara) cada una de las capas ráster globales utilizando el límite vectorial del estado de Sinaloa para delimitar el área de estudio. Posteriormente, se integraron y organizaron las capas resultantes correspondientes a las variables de temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación mensual, cubriendo tanto el periodo histórico como cada combinación de escenario climático y horizonte temporal futuro.

Para vincular esta información climática con los asentamientos humanos, se emplearon las coordenadas geográficas de las localidades del estado de Sinaloa obtenidas del Marco Geoestadístico Nacional de 2025 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2025). Con esta información, se generó un mapa de distribución espacial que ilustra la ubicación y cobertura de las localidades evaluadas a lo largo del estado (Figura 1).

Posteriormente, mediante la herramienta *Sample Raster Values* (Muestra de valores ráster), se extrajeron los valores climáticos mensuales precisos para cada punto geográfico, generando una extensa base de datos puntual con la información climática correspondiente a todas las localidades del estado. Cabe destacar que, dado que los productos de WorldClim ya incorporan un procedimiento de reducción de escala estadística (*statistical downscaling*), las superficies climáticas resultantes fueron adecuadas para el análisis a escala local sin requerir un proceso adicional de regionalización.

Finalmente, la información obtenida mediante el procesamiento geoespacial fue exportada, organizada y sistematizada en Microsoft Excel, estructurando una base de datos independiente para cada escenario climático y horizonte temporal. Cada registro contiene la

identificación de la localidad, municipio y los valores mensuales correspondientes a las variables climáticas analizadas. Posteriormente, las diferentes bases fueron integradas en una estructura única de consulta que permitió relacionar la información histórica con las proyecciones futuras, manteniendo una organización homogénea entre escenarios, periodos y variables climáticas.

El desarrollo de SICCLOS se realizó utilizando Microsoft Excel como plataforma de implementación, a través del lenguaje Visual Basic, debido a su amplia disponibilidad y facilidad de uso por parte de usuarios con distintos niveles de conocimiento y experiencia. La plataforma fue diseñada mediante hojas de cálculo interconectadas que integran la base de datos climática con una interfaz gráfica de consulta, permitiendo automatizar la recuperación e identificación de información mediante listas desplegables y funciones de búsqueda para identificar localidades específicas de cada municipio. Esta estructura elimina la necesidad de que el usuario manipule directamente archivos geoespaciales o utilice software especializado para consultar información climática.

El funcionamiento del sistema inicia con la selección del municipio y posteriormente de la localidad de interés mediante menús desplegables incorporados en la interfaz principal. Una vez realizada la selección, la plataforma consulta automáticamente la base de datos interna y despliega los valores mensuales de temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación correspondientes al periodo histórico de referencia (1970–2000), así como las proyecciones climáticas para los horizontes 2041–2060 y 2061–2080 bajo los escenarios SSP245, SSP370 y SSP585. De manera simultánea, el sistema genera automáticamente tablas con la información mensual, climogramas y tablas de anomalías climáticas comparando las condiciones del periodo de referencia versus el periodo climático futuro elegido, con la intención de conocer la tendencia de aumento o disminución de temperatura o precipitación.

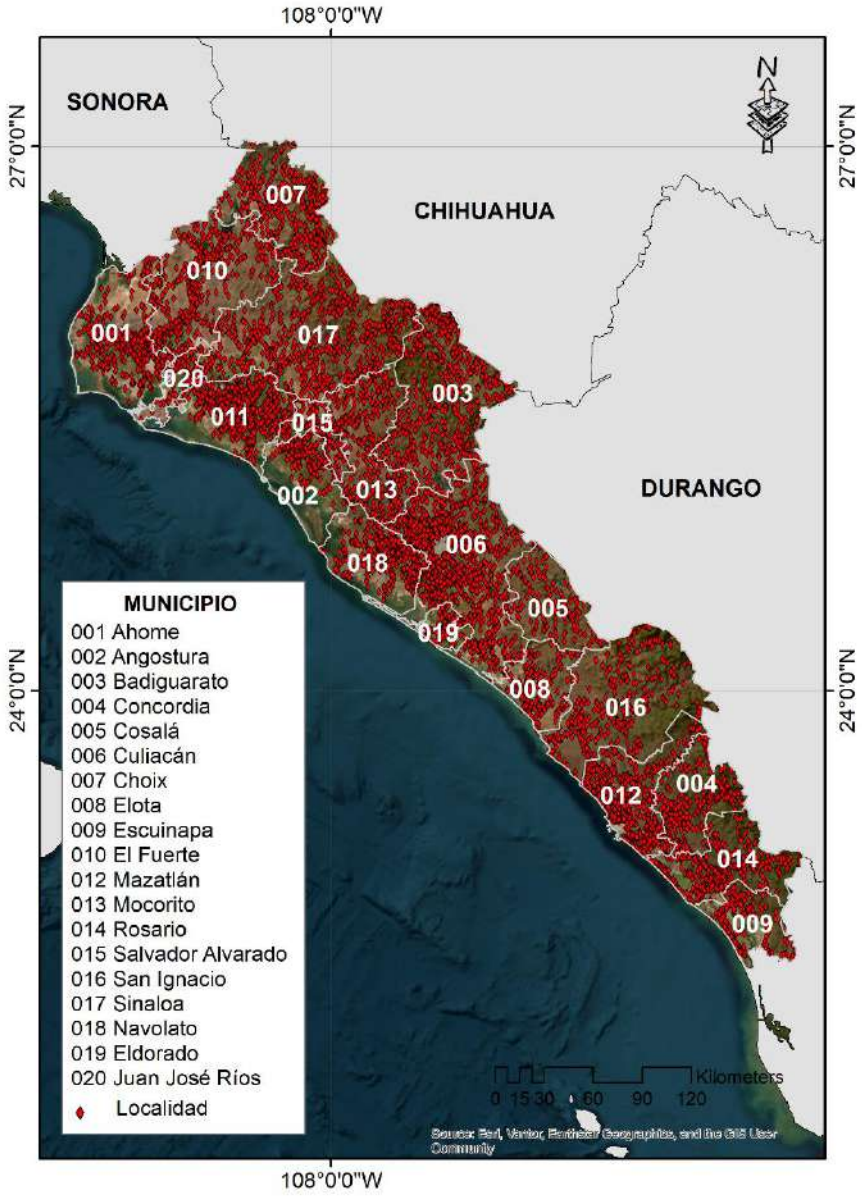


Figura 1. Distribución geográfica de las localidades del estado de Sinaloa de acuerdo al Marco Geoestadístico Nacional de 2025 (INEGI, 2025).

La automatización del proceso de consulta reduce considerablemente el tiempo requerido para obtener información climática y elimina la necesidad de realizar procesos de descarga,

procesamiento espacial e interpretación de bases de datos climáticas por parte del usuario. Bajo este contexto, SICCLOS constituye una herramienta orientada a facilitar el acceso a información climática histórica y proyecciones de cambio climático para investigadores, instituciones gubernamentales, productores y tomadores de decisiones interesados en la planificación territorial, la gestión de recursos naturales y el diseño de estrategias de adaptación al cambio climático.

Resultados y discusión

Como resultado del desarrollo metodológico, el software SICCLOS automatiza de manera exitosa la consulta de información climática histórica y proyecciones de cambio climático para las localidades del estado de Sinaloa. Una vez que el usuario define el municipio y la localidad de interés en la interfaz principal, el sistema recupera automáticamente la información almacenada en la base de datos interna y despliega los valores mensuales de temperatura (media, máxima y mínima) y precipitación correspondiente al periodo histórico de referencia (1970–2000), así como las proyecciones para los periodos futuros 2041–2060 (2050) y 2061–2080 (2070) bajo los escenarios SSP245, SSP370 y SSP585.

De manera simultánea a la consulta, SICCLOS genera automáticamente tablas comparativas y construye climogramas que integran la temperatura media y la precipitación mensual **(**Figura 2). Esta presentación didáctica permite visualizar las variaciones estacionales del clima y comparar de forma inmediata las diferencias entre las condiciones climáticas actuales y las proyecciones futuras. La organización simultánea de la información facilita tanto el análisis cuantitativo de los cambios en cada variable como su interpretación visual, sin que el usuario requiera manipular bases de datos climáticas o realizar procedimientos adicionales de procesamiento espacial.

La automatización del proceso de consulta reduce considerablemente el tiempo requerido para acceder a información climática a escala de localidad, eliminando la necesidad de descargar, procesar e interpretar grandes volúmenes de información geoespacial. Esta característica convierte a SICLOS en una herramienta orientada a facilitar el acceso a información climática para usuarios con distintos niveles de experiencia técnica.

Los servicios climáticos tienen como finalidad transformar datos climáticos en información útil que apoye la toma de decisiones en diferentes sectores productivos, gubernamentales y de investigación (Howard et al., 2020). Bajo este contexto, SICCLOS constituye una herramienta de consulta que integra información climática histórica y proyecciones de cambio climático en una interfaz desarrollada en Microsoft Excel, simplificando el acceso a

información climática que tradicionalmente requiere la descarga y procesamiento de capas ráster mediante Sistemas de Información Geográfica. Mientras que plataformas como WorldClim proporcionan información climática de alta resolución espacial para aplicaciones científicas (Fick & Hijmans, 2017; WorldClim, 2026), su aprovechamiento generalmente demanda conocimientos técnicos en procesamiento geoespacial. SICCLOS reduce esta barrera al presentar la información procesada mediante un entorno de consulta intuitivo e interactivo.

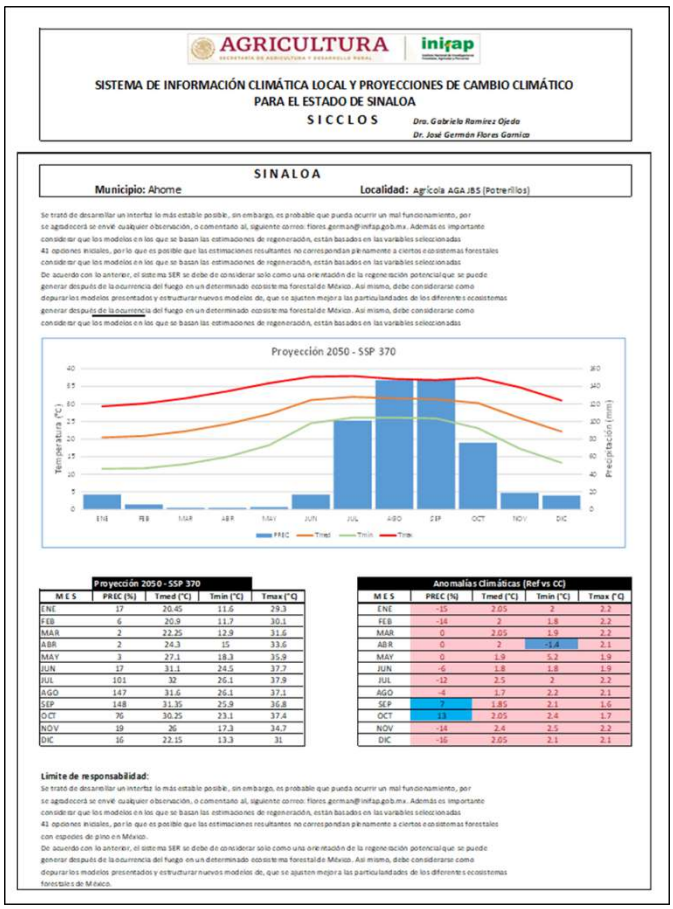


Figura 2. Ejemplo de consulta y visualización de la información climática seleccionando un municipio y localidad específica del estado de Sinaloa.

La información generada por SICCLOS puede emplearse como apoyo en estudios de reconversión productiva, zonificación agroclimática, gestión de los recursos hídricos y evaluación de la aptitud territorial para diferentes cultivos. De acuerdo con el IPCC (2023), la disponibilidad de información climática constituye un elemento fundamental para fortalecer la capacidad de adaptación y reducir la vulnerabilidad frente a los impactos del cambio climático.

Además de su aplicación técnica, la plataforma posee un alto valor didáctico en el ámbito académico; en la formación de perfiles orientados a la ingeniería empresarial agropecuaria, SICLOS funciona como un simulador ágil que acerca a los estudiantes a la toma de decisiones y al análisis de viabilidad de proyectos frente al cambio climático, sin saturarlos con la complejidad operativa de la geomática.

Una de las principales fortalezas de SICCLOS radica precisamente en su implementación mediante Microsoft Excel, una plataforma ampliamente disponible y familiar para instituciones públicas, centros de investigación, organismos de planeación y productores. Al reducir la complejidad operativa, se favorece la democratización del acceso a servicios climáticos, aspecto considerado esencial para ampliar el uso de este tipo de información en los procesos de toma de decisiones (Howard et al., 2020).

No obstante, los resultados proporcionados por SICCLOS deben interpretarse considerando las limitaciones inherentes a los modelos climáticos. Pickler y Mölg (2021) señalan que el desempeño de las proyecciones depende, entre otros factores, del Modelo de Circulación General utilizado y de la capacidad de éste para representar los procesos atmosféricos de cada región, existiendo una incertidumbre particularmente elevada en las proyecciones de precipitación. Asimismo, los escenarios SSP representan trayectorias plausibles de evolución socioeconómica y emisiones de gases de efecto invernadero, por lo que las variables climáticas proyectadas no constituyen pronósticos determinísticos, sino posibles condiciones futuras bajo diferentes supuestos de desarrollo. En consecuencia, la información generada por SICLOS debe interpretarse como un insumo para la evaluación de riesgos, la planificación territorial y el diseño de estrategias de adaptación, complementándose con información local y otros elementos de análisis para apoyar la toma de decisiones, tal como recomienda el IPCC (2023).

Conclusiones

SICCLOS constituye una herramienta de apoyo para la consulta, visualización y análisis de información climática histórica y de proyecciones de cambio climático a escala local para el estado de Sinaloa. Su principal contribución científica y técnica radica en integrar, en una sola plataforma, datos provenientes de modelos climáticos globales bajo distintos escenarios de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP), facilitando el acceso a información climática que, de otra forma, requeriría conocimientos especializados en geomática para su procesamiento e interpretación. Esta integración favorece la generación rápida de diagnósticos climáticos y fortalece la toma de decisiones en sectores fundamentales como la agricultura, la gestión de los recursos hídricos, la planeación territorial, la protección civil y la investigación científica.

Además, la automatización de las consultas y la presentación didáctica de resultados —mediante tablas comparativas y climogramas— mejoran significativamente la accesibilidad y reducen el tiempo requerido para obtener información confiable. Al democratizar el acceso a estos datos, SICCLOS se consolida como una herramienta útil no solo para investigadores, productores e instituciones gubernamentales, sino también como un valioso instrumento académico para la formación de estudiantes y futuros profesionales del sector agropecuario, acercándolos a la planeación estratégica frente al cambio climático.

Cabe destacar también, que pueden realizarse versiones futuras de SICLOS donde se incorporen variables climáticas adicionales, como humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, así como índices de eventos extremos relacionados con sequías, olas de calor y precipitaciones intensas.

Asimismo, su posible migración hacia una plataforma web permitiría ampliar su disponibilidad, facilitar las actualizaciones de información de manera dinámica y eliminar las limitaciones asociadas a un archivo local de escritorio. Finalmente, esta plataforma puede replicarse para otras entidades federativas, así como la incorporación de nuevos conjuntos de datos y modelos climáticos conforme estén disponibles, consolidando a SICLOS como un sistema de referencia para la evaluación de escenarios de cambio climático y la planificación de estrategias de adaptación climática en México.

Literatura citada

Brasseur, G. P., & Gallardo, L. (2016). Climate services: Lessons learned and future prospects. Earth's Future. 4(3): 79–89. https://doi.org/10.1002/2015EF000338

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) - Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2026). Normales climatológicas por estado - Sinaloa. smn.conagua.gob.mx. https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado?estado=sin

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2026). Información geográfica. conabio.gob.mx. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/

Comisión para la Investigación y Defensa de las Hortalizas de Sinaloa. (2023). La situación climática que preocupa en el Estado de Sinaloa. cidh.org.mx. https://cidh.org.mx/situacion-climatica-en-sinaloa/

Estrada-Contreras, I., Bermúdez, A., Castro, R. S., & Ivanova, A. (2024). Potential distribution and carbon sequestration of Rhizophora mangle L. in El Vizcaíno Biosphere Reserve, Baja California Sur, Mexico. Diversity. 16(11): 660. https://doi.org/10.3390/d16110660

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development. 9(5): 1937–1958. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology. 37(12): 4302–4315. https://doi.org/10.1002/joc.5086

Gobierno del Estado de Sinaloa, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Secretaría de Desarrollo Social y Humano (SEDESHU), & Instituto de Apoyo a la Investigación e Innovación (INAPI). (2016). Plan Estatal de Cambio Climático de Sinaloa. cambioclimatico.gob.mx. https://cambioclimatico.gob.mx/estadosymunicipios/25_Sin_PCC(2016).pdf

Hausfather, Z. (2019). CMIP6: the next generation of climate models explained. Carbon Brief. https://www.carbonbrief.org/cmip6-the-next-generation-of-climate-models-explained

Howard, S., Howard, S., & Howard, S. (2020). Quantitative market analysis of the European Climate Services sector: The application of the kMatrix big data market analytical tool to provide robust market intelligence. Climate Services. 17: 100108. https://doi.org/10.1016/j.cliser.2019.100108

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2025). Marco Geoestadístico, 2025 (25 Sinaloa). inegi.org.mx. https://www.inegi.org.mx/

IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. ipcc.ch. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2026). What are Shared Socioeconomic Pathways, or SSPs? Global Sea Level Change. https://earth.gov/sealevel/faq/124/what-are-shared-socioeconomic-pathways-or-ssps/

Pickler, C., & Mölg, T. (2021). General circulation model selection technique for downscaling: Exemplary application to East Africa. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 126: e2020JD033033. https://doi.org/10.1029/2020JD033033

Ruiz C., J. A., Medina G., G., Macías C., J., Silva S., M. M., & Díaz P., G. (2005). Estadísticas climatológicas básicas del estado de Sinaloa (Período 1961-2003) (Libro Técnico Núm. 2). INIFAP-CIRNO.

WorldClim. (2026). Global climate and weather data. worldclim.org. https://www.worldclim.org/data/index.html